

Japanese Patent Application No. 2001-134545 (Not yet Laid-open)

Application date : May 1, 2001

Applicant : THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.

Title : SEMICONDUCTOR LASER APPARATUS, SEMICONDUCTOR LASER
5 MODULE AND RAMAN AMPLIFIER USING THE SAME

[NAME OF DOCUMENT] Abstract

[Abstract]

[Problem] To enable stable high-gain amplification with low
10 noise characteristics and wide dynamic range, suitable for
a light source for excitation of a Raman amplifier and the
like.

[Solving Means] In the neighborhood of a GRIN-SCH-MQW active
layer 3 which is formed between a output-side reflecting film
15 15 provided to the output end of laser light and a reflecting
film 14 provided to the reflecting end of the laser light,
diffraction grating 13 is arranged at the output-side
reflecting film 15 side. Combined setting of oscillation
parameters including an oscillator length L_r and wavelength
20 selective characteristics of the diffraction grating 13 is
performed in such a way that a product obtained by multiplying
a coupling coefficient k_i and a diffraction grating length
 L_g of the diffraction grating 13 is set at 0.3 or less, thereby
outputting laser light which includes two or more longitudinal
25 modes of oscillation in a half width of oscillation wavelength

spectrum.

[Selected Figure] Fig. 2

【書類名】 明細書

【発明の名称】 半導体レーザ装置、半導体レーザモジュールおよびこれを用いたラマン増幅器

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 レーザ光の出射端面に設けた第 1 反射膜と該レーザ光の反射端面に設けた第 2 反射膜との間に形成された活性層の近傍であって前記第 1 反射膜側に部分的に設けられた回折格子を有し、

前記活性層を挟む前記第 1 反射膜と前記第 2 反射膜とによって形成される光共振器の共振器長と前記回折格子の波長選択特性とを含む発振パラメータの組み合わせ設定によって発振波長スペクトルの半値幅内に 2 本以上の発振縦モードを含むレーザ光を出力することを特徴とする半導体レーザ装置。

【請求項 2】 前記回折格子の第 1 反射膜側端面は、該第 1 反射膜に接合されることを特徴とする請求項 1 に記載の半導体レーザ装置。

【請求項 3】 前記回折格子は、回折格子長が $300\ \mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の半導体レーザ装置。

【請求項 4】 前記回折格子の回折格子長は、前記共振器長の $(300/1300)$ 倍の値以下であることを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれか一つに記載の半導体レーザ装置。

【請求項 5】 前記回折格子は、該回折格子の結合係数と回折格子長との乗算値が 0.3 以下であることを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれか一つに記載の半導体レーザ装置。

【請求項 6】 前記回折格子は、グレーティング周期に所定の周期揺らぎを持たせたことを特徴とする請求項 3 ～ 5 のいずれか一つに記載の半導体レーザ装置。

【請求項 7】 前記回折格子は、前記グレーティング周期をランダムあるいは所定周期で変化させたグレーティングであることを特徴とする請求項 6 に記載の半導体レーザ装置。

【請求項 8】 前記共振器長は、 $800\ \mu\text{m}$ 以上であることを特徴とする請求項 1 ～ 7 のいずれか一つに記載の半導体レーザ装置。

【請求項9】 請求項1～8に記載の半導体レーザ装置と、
前記半導体レーザ装置から出射されたレーザ光を外部に導波する光ファイバと
前記半導体レーザ装置と前記光ファイバと光結合を行う光結合レンズ系と、
を備えたことを特徴とする半導体レーザモジュール。

【請求項10】 前記半導体レーザ装置の温度を制御する温度制御装置と、
前記光結合レンズ系内に配置され、光ファイバ側からの反射戻り光の入射を抑
制するアイソレータと、
をさらに備えたことを特徴とする請求項9に記載の半導体レーザモジュール。

【請求項11】 請求項1～8に記載の半導体レーザ装置、あるいは請求項
9または10に記載の半導体レーザモジュールを広帯域ラマン増幅用の励起光源
として用いたことを特徴とするラマン増幅器。

【請求項12】 前記半導体レーザモジュールを用いて、増幅対象媒体の光
ファイバに対して信号光の入射側から励起する前方励起あるいは信号光の出力側
から励起する後方励起あるいは信号光の入射側および出力側の双方向から励起す
る双方向励起のいずれかを行うことを特徴とする請求項11に記載のラマン増幅
器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

この発明は、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA：Erbium Doped Fiber Amplifier）やラマン増幅器などの励起用光源に適した半導体レーザ装置、半導体レーザモジュールおよびこれを用いたラマン増幅器に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

近年、インターネットをはじめとする様々なマルチメディアの普及に伴って、光通信に対する大容量化の要求が大きくなっている。従来、光通信では、光ファイバによる光の吸収が少ない波長である1310nmもしくは1550nmの帯域において、それぞれ単一の波長による伝送が一般的であった。この方式では、

多くの情報を伝達するためには伝送経路に敷設する光ファイバの芯数を増やす必要があり、伝送容量の増加に伴ってコストが増加するという問題点があった。

【0003】

そこで、高密度波長分割多重 (DWDM : Dense-Wavelength Division Multiplexing) 通信方式が用いられるようになった。このDWDM通信方式は、主にEDFAを用い、この動作帯域である1550nm帯において、複数の波長を使用して伝送を行う方式である。このDWDM通信方式あるいはWDM通信方式では、1本の光ファイバを用いて複数の異なる波長の光信号を同時に伝送することから、新たな線路を敷設する必要がなく、ネットワークの伝送容量の飛躍的な増加をもたらすことを可能としている。

【0004】

このEDFAを用いた一般的なWDM通信方式では、利得平坦化の容易な1550nmから実用化され、最近では、利得係数が小さいために利用されていなかった1580nm帯にまで拡大している。しかしながら、EDFAで増幅可能な帯域に比して光ファイバの低損失帯域の方が広いことから、EDFAの帯域外で動作する光増幅器、すなわちラマン増幅器への関心が高まっている。

【0005】

ラマン増幅器は、エルビウムのような希土類イオンを媒体とした光増幅器がイオンのエネルギー準位によって利得波長帯が決まるのに対し、励起光の波長によって利得波長帯が決まるという特徴を持ち、励起光波長を選択することによって任意の波長帯を増幅することができる。

【0006】

ラマン増幅では、光ファイバに強い励起光を入射すると、誘導ラマン散乱によって、励起光波長から約100nm程度長波長側に利得が現れ、この励起された状態の光ファイバに、この利得を有する波長帯域の信号光を入射すると、この信号光が増幅されるというものである。したがって、ラマン増幅器を用いたWDM通信方式では、EDFAを用いた通信方式に比して、信号光のチャネル数をさらに増加させることができる。

【0007】

図27は、WDM通信システムに用いられる従来のラマン増幅器の構成を示すブロック図である。図27において、ファブリペロー型の半導体発光素子180a～180dとファイバグレーティング181a～181dとがそれぞれ対となった半導体レーザモジュール182a～182dは、励起光のもとになるレーザ光を偏波合成カップラ61a, 61bに出力する。各半導体レーザモジュール182a, 182bが出力するレーザ光の波長は同じであるが、偏波合成カップラ61aによって異なる偏波面をもった光を合成している。同様にして、各半導体レーザモジュール182c, 182dが出力するレーザ光の波長は同じであるが、偏波合成カップラ61bによって異なる偏波面をもった光を合成している。偏波合成カップラ61a, 61bは、それぞれ偏波合成したレーザ光をWDMカップラ62に出力する。なお、偏波合成カップラ61a, 61bから出力されるレーザ光の波長は異なる。

【0008】

WDMカップラ62は、アイソレータ60を介して偏波合成カップラ61a, 61bから出力されたレーザ光を合波し、WDMカップラ65を介し、励起光として増幅用ファイバ64に出力する。この励起光が入力された増幅用ファイバ64には、増幅対象の信号光が、信号光入力ファイバ69からアイソレータ63を介して入力され、励起光と合波してラマン増幅される。

【0009】

増幅用ファイバ64内においてラマン増幅された信号光（増幅信号光）は、WDMカップラ65およびアイソレータ66を介してモニタ光分配用カップラ67に入力される。モニタ光分配用カップラ67は、増幅信号光の一部を制御回路68に出力し、残りの増幅信号光を出力レーザ光として信号光出力ファイバ70に出力する。

【0010】

制御回路68は、入力された一部の増幅信号光をもとに各半導体発光素子180a～180dの発光状態、たとえば光強度を制御し、ラマン増幅の利得帯域が平坦な特性となるようにフィードバック制御する。

【0011】

図28は、ファイバグレーティングを用いた半導体レーザモジュールの概要構成を示す図である。図28において、この半導体レーザモジュール201は、半導体発光素子202と光ファイバ203とを有する。半導体発光素子202は、活性層221を有する。活性層221は、一端に光反射面222が設けられ、他端に光出射面223が設けられる。活性層221内で生じた光は、光反射面222で反射して、光出射面223から出力される。

【0012】

半導体発光素子202の光出射面223には、光ファイバ203が配置され、光出射面223と光結合される。光ファイバ203内のコア232には、光出射面223から所定位置にファイバグレーティング233が形成され、ファイバグレーティング233は、特性波長の光を選択的に反射する。すなわち、ファイバグレーティング233は、外部共振器として機能し、ファイバグレーティング233と光反射面222との間で共振器を形成し、ファイバグレーティング233によって選択された特定波長のレーザ光が増幅されて出力レーザ光241として出力される。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上述した半導体レーザモジュール201（182a～182d）は、ファイバグレーティング233と半導体発光素子202との間隔が長い場合、ファイバグレーティング233と光反射面222との間の共振によって相対強度雑音（RIN: Relative Intensity Noise）が大きくなる。ラマン増幅では、増幅の生じる過程が早く起こるため、励起光強度が揺らいでいると、ラマン利得も揺らぐことになり、このラマン利得の揺らぎがそのまま増幅された信号強度の揺らぎとして出力されてしまい、安定したラマン増幅を行わせることができないという問題点があった。

【0014】

ここで、ラマン増幅器としては、図27に示したラマン増幅器のように信号光に対して後方から励起する後方励起方式のほかに、信号光に対して前方から励起する前方励起方式および双方向から励起する双方向励起方式がある。現在、ラマ

ン増幅器として多用されているのは、後方励起方式である。その理由は、弱い信号光が強い励起光とともに同方向に進行する前方励起方式では、励起光強度が揺らぐという問題があるからである。したがって、前方励起方式にも適用できる安定した励起光源の出現が要望されている。すなわち、従来のファイバグレーティングを用いた半導体レーザモジュールを用いると、適用できる励起方式が制限されるという問題点があった。

【0015】

また、上述した半導体レーザモジュール201は、ファイバグレーティング233を有した光ファイバ203と、半導体発光素子202とを光結合する必要がある。組立時の光軸合わせに時間と労力とがかかり、結果的にコストが高くなるとともに、共振器内における機械的な光結合であるために、レーザの発振特性が機械的振動などによって変化してしまうおそれがあり、安定した励起光を提供することができない場合が生じるという問題点があった。

【0016】

さらに、ラマン増幅器におけるラマン増幅では、信号光の偏波方向と励起光の偏波方向とが一致することを条件としている。すなわち、ラマン増幅では、増幅利得の偏波依存性があり、信号光の偏波方向と励起光の偏波方向とのずれによる影響を小さくする必要がある。ここで、後方励起方式の場合、信号光は、伝搬中に偏波がランダムとなるため、問題は生じないが、前方励起方式の場合、偏波依存性が強く、励起光の直交偏波合成、デボライズなどによって偏波依存性を小さくする必要がある。すなわち、偏光度(DOP: Degree Of Polarization)を小さくする必要がある。

【0017】

なお、ラマン増幅などでは、WDM通信方式に用いられるため、入力される信号光の波長数などに応じて増幅利得特性を変化させる場合があり、このために広いダイナミックレンジをもった高出力動作が要求され、この場合に、駆動範囲の全域にわたり、所望の発振スペクトルが維持されることが要求される。すなわち、駆動電流－光出力特性(I－L)特性の線形性が要求される。

【0018】

この発明は上記に鑑みてなされたもので、ラマン増幅器などの励起用光源に適し、低雑音特性と広いダイナミックレンジとを有し、安定かつ高利得増幅を可能とする半導体レーザ装置、半導体レーザモジュールおよびこれを用いたラマン増幅器を提供することを目的とする。

【0019】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、請求項1にかかる半導体レーザ装置は、レーザ光の出射端面に設けた第1反射膜と該レーザ光の反射端面に設けた第2反射膜との間に形成された活性層の近傍であって前記第1反射膜側に部分的に設けられた回折格子を有し、前記活性層を挟む前記第1反射膜と前記第2反射膜とによって形成される光共振器の共振器長と前記回折格子の波長選択特性とを含む発振パラメータの組み合わせ設定によって発振波長スペクトルの半値幅内に2本以上の発振縦モードを含むレーザ光を出力することを特徴とする。

【0020】

この請求項1の発明によれば、レーザ光の出射端面に設けた第1反射膜と該レーザ光の反射端面に設けた第2反射膜との間に形成された活性層の近傍であって前記第1反射膜側に回折格子を部分的に設け、前記活性層を挟む前記第1反射膜と前記第2反射膜とによって形成される光共振器の共振器長と前記回折格子の波長選択特性とを含む発振パラメータの組み合わせ設定によって発振波長スペクトルの半値幅内に2本以上の発振縦モードを含むレーザ光を出力するようにしている。

【0021】

また、請求項2にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記回折格子の第1反射膜側端面は、該第1反射膜に接合されることを特徴とする。

【0022】

この請求項2の発明によれば、前記回折格子の第1反射膜側端面は、該第1反射膜に接合するようにしている。

【0023】

また、請求項3にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記回折

格子は、回折格子長が $300\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする。

【0024】

この請求項3の発明によれば、前記回折格子の回折格子長を $300\mu\text{m}$ 以下としている。

【0025】

また、請求項4にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記回折格子の回折格子長は、前記共振器長の $(300/1300)$ 倍の値以下であることを特徴とする。

【0026】

この請求項4の発明によれば、前記回折格子の回折格子長を、前記共振器長の $(300/1300)$ 倍の値以下としている。

【0027】

また、請求項5にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記回折格子は、該回折格子の結合係数と回折格子長との乗算値が0.3以下であることを特徴とする。

【0028】

この請求項5の発明によれば、前記回折格子の結合係数と回折格子長との乗算値を0.3以下の小さな値として駆動電流－光出力特性の線形性を良好にしている。

【0029】

また、請求項6にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記回折格子は、グレーティング周期に所定の周期揺らぎを持たせたことを特徴とする。

【0030】

この請求項6の発明によれば、前記回折格子に、グレーティング周期に所定の周期揺らぎを持たせたるようにし、これによって、発振波長スペクトルの半値幅を広げるようにしている。

【0031】

また、請求項7にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記回折格子は、前記グレーティング周期をランダムあるいは所定周期で変化させたグレ

ーティングであることを特徴とする。

【0032】

この請求項7の発明によれば、前記回折格子を、前記グレーティング周期をランダムあるいは所定周期で変化させたグレーティングとし、これによって、回折格子に周期的揺らぎを発生させ、発振波長スペクトルの半値幅を広げるようにしている。

【0033】

また、請求項8にかかる半導体レーザ装置は、上記の発明において、前記共振器長は、800 μ m以上であることを特徴とする。

【0034】

この請求項8の発明によれば、前記共振器長を、800 μ m以上とし、高出力動作を可能としている。

【0035】

また、請求項9にかかる半導体レーザモジュールは、請求項1～8に記載の半導体レーザ装置と、前記半導体レーザ装置から出射されたレーザ光を外部に導波する光ファイバと、前記半導体レーザ装置と前記光ファイバと光結合を行う光結合レンズ系とを備えたことを特徴とする。

【0036】

この請求項9の発明によれば、ファイバグレーティングを用いない半導体レーザ装置を用いて該半導体レーザ装置の共振器が物理的に分離されていないため、光軸合わせなどを行う必要がなく、半導体レーザモジュールの組立が容易になるとともに、機械的振動などによってレーザの発振特性が変化しにくくなり、安定したレーザ光を信頼性高く、かつ安定して出力することができる。

【0037】

また、請求項10にかかる半導体レーザモジュールは、上記の発明において、前記半導体レーザ装置の温度を制御する温度制御装置と、前記光結合レンズ系内に配置され、光ファイバ側からの反射戻り光の入射を抑制するアイソレータとをさらに備えたことを特徴とする。

【0038】

この請求項 1 0 の発明によれば、ファイバグレーティングを用いない半導体レーザー装置を用いているため、インライン式のファイバ型と異なり、偏波無依存アイソレータを使用することができ、挿入損失の小さい半導体レーザーモジュールを実現することができる。

【 0 0 3 9 】

また、請求項 1 1 にかかるラマン増幅器は、請求項 1 ～ 8 に記載の半導体レーザー装置、あるいは請求項 9 または 1 0 に記載の半導体レーザーモジュールを広帯域ラマン増幅用の励起光源として用いたことを特徴とする。

【 0 0 4 0 】

この請求項 1 1 の発明によれば、請求項 1 ～ 8 に記載の半導体レーザー装置、あるいは請求項 9 または 1 0 に記載の半導体レーザーモジュールを広帯域ラマン増幅用の励起光源として用い、上述した各半導体レーザー装置あるいは各半導体レーザーモジュールの作用効果を奏するようにしている。

【 0 0 4 1 】

また、請求項 1 2 にかかるラマン増幅器は、上記の発明において、前記半導体レーザーモジュールを用いて、増幅対象媒体の光ファイバに対して信号光の入射側から励起する前方励起あるいは信号光の出力側から励起する後方励起あるいは信号光の入射側および出力側の双方向から励起する双方向励起のいずれかを行うことを特徴とする。

【 0 0 4 2 】

この請求項 1 2 の発明によれば、安定した励起光を出力する前記半導体レーザーモジュールを用いているので、増幅対象媒体の光ファイバに対して信号光の入射側から励起する前方励起あるいは信号光の出力側から励起する後方励起あるいは信号光の入射側および出力側の双方向から励起する双方向励起のいずれかをも行うことができる。

【 0 0 4 3 】

【発明の実施の形態】

以下に添付図面を参照して、この発明にかかる半導体レーザー装置、半導体レーザーモジュールおよびラマン増幅器の好適な実施の形態について説明する。

【0044】

(実施の形態1)

まず、この発明の実施の形態1について説明する。図1は、この発明の実施の形態1である半導体レーザ装置の概要構成を示す斜めからみた破断図である。また、図2は、図1に示した半導体レーザ装置の長手方向の縦断面図である。さらに、図3は、図2に示した半導体レーザ装置のA-A線断面図である。図1～図3において、この半導体レーザ装置20は、 n -InP基板1の(100)面上に、順次、 n -InPによるバッファ層と下部クラッド層とを兼ねた n -InP バッファ層2、圧縮歪みをもつGRIN-SCH-MQW (Graded Index-Separate Confinement Heterostructure Multi Quantum Well) 活性層3、 p -InP スペーサ層4、および p -InPクラッド層6、InGaAsPキャップ層7が積層された構造を有する。

【0045】

p -InPスペーサ層4内には、出射側反射膜15から $100\mu\text{m}$ 延び、膜厚 20nm を有した p -InGaAsPの回折格子13が、ピッチ約 220nm で周期的に形成され、中心波長 $1.48\mu\text{m}$ のレーザ光を選択するようにしている。この回折格子13は、出射側反射膜15に接する配置にすることが望ましいが、必ずしも接する配置にしなくても、回折格子13の機能を発揮する範囲内、たとえば $20\mu\text{m}$ ～ $100\mu\text{m}$ 程度の範囲内で出射側反射膜15から離隔する配置としてもよい。また、半導体レーザ装置20の製造時における半導体レーザ装置20の劈開位置のばらつきなどによって、回折格子13が反射膜14側に残っていてもよい。

【0046】

図4は、半導体レーザ装置20の劈開位置ばらつきによる回折格子13の配置ばらつきを示す図である。図4に示した劈開は、ウェハなどの半導体基板上においてマトリクス状に形成された複数の半導体レーザ装置から、一連の半導体レーザ装置が隣接したレーザバーを生成する場合である。なお、レーザバーは、一連の半導体レーザ装置の長手方向側面が隣接した半導体レーザ装置群である。このレーザバーの劈開に際し、それぞれ正確な劈開位置Ctによって劈開される場合

、半導体レーザ装置20のように、各半導体レーザ装置の回折格子13-1～13-3は、各半導体レーザ装置の出射側反射膜15に接することになる。しかし、レーザバーの劈開位置が劈開位置Ct-1、Ct-2となった場合、すなわち劈開位置が正確な劈開位置Ctから出射側にシフトした場合、この劈開によって切り出される半導体レーザ装置21の回折格子13-1は、その後成膜される出射側反射膜15との間に距離Δd離隔することになる。また、レーザバーの劈開位置が劈開位置Ct-2、Ct-3のように正確な劈開位置Ct間の間隔を広げるような場合、この劈開によって切り出される半導体レーザ装置22の回折格子13-2は、その後成膜される出射側反射膜15との間に距離Δd離隔するとともに、反射膜14側に隣接する半導体レーザ装置の回折格子13-3の一部の回折格子13-3aが残って配置されてしまう。このように回折格子13-1、13-2が出射側反射膜15から離隔する場合あるいは反射膜14側に回折格子13-3aとして残る場合であっても、半導体レーザ装置20とほぼ同じ機能を発揮することができる。

【0047】

この回折格子13を含むp-InPスペーサ層4、GRIN-SCH-MQW活性層3、およびn-InPバッファ層2の上部は、メサストライプ状に加工され、メサストライプの両側は、電流ブロッキング層として形成されたp-InPブロッキング層8とn-InPブロッキング層9によって埋め込まれている。また、InGaAsPキャップ層7の上面には、p側電極10が形成され、n-InP基板1の裏面には、n側電極11が形成される。

【0048】

半導体レーザ装置20の長手方向の一端面である光反射端面には、反射率80%以上の高光反射率をもつ反射膜14が形成され、他端面である光出射端面には、反射率が2%以下、好ましくは1%以下の低光反射率をもつ出射側反射膜15が形成される。反射膜14と出射側反射膜15とによって形成された光共振器のGRIN-SCH-MQW活性層3内に発生した光は、反射膜14によって反射し、出射側反射膜15を介し、レーザ光として出射される。

【0049】

この実施の形態1における半導体レーザ装置20は、ラマン増幅器の励起用光源として用いられることを前提とし、その発振波長 λ_0 は、1100nm～1550nmであり、共振器長Lは、800 μ m以上3200 μ m以下としている。ところで、一般に、半導体レーザ装置の共振器によって発生する縦モードのモード間隔 $\Delta\lambda$ は、等価屈折率を「n」とすると、次式で表すことができる。すなわち、

$$\Delta\lambda = \lambda_0^2 / (2 \cdot n \cdot L)$$

である。ここで、発振波長 λ_0 を1480 μ mとし、実効屈折率を3.5とすると、共振器長Lが800 μ mのとき、縦モードのモード間隔 $\Delta\lambda$ は、約0.39nmとなり、共振器長が3200 μ mのとき、縦モードのモード間隔 $\Delta\lambda$ は、約0.1nmとなる。すなわち、共振器長Lを長くすればするほど、縦モードのモード間隔 $\Delta\lambda$ は狭くなり、単一縦モードのレーザ光を発振するための選択条件が厳しくなる。

【0050】

一方、回折格子13は、そのブラッグ波長によって縦モードを選択する。この回折格子13による選択波長特性は、図5に示す発振波長スペクトル30として表される。

【0051】

図5に示すように、この実施の形態1では、回折格子13を有した半導体レーザ装置20による発振波長スペクトル30の半値幅 $\Delta\lambda_h$ で示される波長選択特性内に、発振縦モードを複数存在させるようにしている。従来のDFB半導体レーザ装置では、共振器長Lを800 μ m以上とすると、単一縦モード発振が困難であったため、かかる共振器長Lを有した半導体レーザ装置は用いられなかった。しかしながら、この実施の形態1の半導体レーザ装置20では、共振器長Lを積極的に800 μ m以上とすることによって、発振波長スペクトルの半値幅 $\Delta\lambda_h$ 内に複数の発振縦モードを含ませてレーザ出力するようにしている。図5では、発振波長スペクトルの半値幅 $\Delta\lambda_h$ 内に3つの発振縦モード31～33を有している。

【0052】

複数の発振縦モードを有するレーザ光を用いると、単一縦モードのレーザ光を用いた場合に比して、レーザ出力のピーク値を抑えて、高いレーザ出力値を得ることができる。たとえば、この実施の形態1に示した半導体レーザ装置では、図6(b)に示すプロファイルを有し、低いピーク値で高レーザ出力を得ることができる。これに対し、図6(a)は、同じレーザ出力を得る場合の単一縦モード発振の半導体レーザ装置のプロファイルであり、高いピーク値を有している。

【0053】

ここで、半導体レーザ装置をラマン増幅器の励起用光源として用いる場合、ラマン利得を大きくするために励起光出力パワーを増大することが好ましいが、そのピーク値が高いと、誘導ブリルアン散乱が発生し、雑音が増加するという不具合が発生する。誘導ブリルアン散乱の発生は、誘導ブリルアン散乱が発生する閾値 P_{th} を有し、同じレーザ出力パワーを得る場合、図6(b)に示すように、複数の発振縦モードを持たせ、そのピーク値を抑えることによって、誘導ブリルアン散乱の閾値 P_{th} 内で、高い励起光出力パワーを得ることができ、その結果、高いラマン利得を得ることが可能となる。

【0054】

また、発振縦モード31～33の波長間隔（モード間隔） $\Delta\lambda$ は、0.1nm以上としている。これは、半導体レーザ装置20をラマン増幅器の励起用光源として用いる場合、モード間隔 $\Delta\lambda$ が0.1nm以下であると、誘導ブリルアン散乱が発生する可能性が高くなるからである。この結果、上述したモード間隔 $\Delta\lambda$ の式によって、上述した共振器長 L が3200 μ m以下であることが好ましいことになる。

【0055】

一方、発振波長スペクトル30の半値幅 $\Delta\lambda_h$ 内に含まれる発振縦モードの本数は、3本以上であることが好ましい。これは、半導体レーザ装置20をラマン増幅器の励起用光源として用いる場合、ラマン増幅が、信号光の偏波方向と励起光の偏波方向とを一致させた状態で生じるという偏波依存性を有しているため、半導体レーザ装置20から出力された励起光を偏波面保持ファイバを用いて偏波合成し、偏光がない励起光とする必要があるが、一般に、発振縦モードの本数が

増大するに従って、必要な偏波面保持ファイバの長さを短くすることができる。
特に、発振縦モードが4, 5本となると、急激に、必要な偏波面保持ファイバの長さが短くなる。したがって、発振縦モードの本数を3本以上、特に4本以上とすることによって、ラマン増幅器に用いる偏波面保持ファイバの長さを短くすることができ、ラマン増幅器を簡素化し、小型化を促進する。さらに、発振縦モードの本数が増大すると、コヒーレント長が短くなり、デボラライズによって偏光度(DOP: Degree Of Polarization)が小さくなり、偏波依存性をなくすることが可能となり、これによっても、ラマン増幅器の簡素化と小型化とを促進することができる。

【0056】

ここで、発振波長スペクトル幅が広すぎると、波長合成カプラによる合波ロスが大きくなるとともに、発振波長スペクトル幅内における波長の動きによって、雑音や利得変動を発生させることになる。このため、発振波長スペクトル30の半値幅 $\Delta\lambda_h$ は、3nm以下、好ましくは2nm以下とする必要がある。

【0057】

さらに、従来の半導体レーザ装置では、図28に示したように、ファイバグレーティングを用いた半導体レーザモジュールとしていたため、ファイバグレーティング233と光反射面222との間の共振によって相対強度雑音(RIN)が大きくなり、安定したラマン増幅を行うことができないが、この実施の形態1に示した半導体レーザ装置20では、ファイバグレーティング233を用いず、出射側反射膜15から出射したレーザ光をそのまま、ラマン増幅器の励起用光源として用いているため、相対強度雑音が小さくなり、その結果、ラマン利得の揺らぎが小さくなり、安定したラマン増幅を行わせることができる。

【0058】

また、図28に示した半導体レーザモジュールでは、ファイバグレーティング233を有する光ファイバ203と半導体発光素子202とを光結合させる必要があるため、半導体レーザ装置の組立時における光軸合わせが必要となり、そのための時間と労力とがかかるが、この実施の形態1の半導体レーザ装置では、共振器ではなく、光出力のための光軸合わせであるため、その組立が容易となる。

また、図28に示した半導体レーザモジュールでは、共振器内に機械的な結合を必要とするため、振動などによってレーザの発振特性が変化する場合が発生するが、この実施の形態1の半導体レーザ装置では、機械的な振動などによるレーザの発振特性の変化がなく、安定した光出力を得ることができる。

【0059】

たとえば、図7は、複数の発振縦モードが出力されたスペクトル図であり、図7では、安定した3本の発振縦モードをもつレーザ光を出力している。なお、図7に示したスペクトルは、回折格子長 $L_g = 100\ \mu\text{m}$ 、共振器長 $L = 1300\ \mu\text{m}$ 、回折格子の結合係数 κ_i と共振器長 L との積 $\kappa_i \cdot L_g = 0.11$ 、出射側反射膜15の反射率が0.1%、反射膜14の反射率が97%、駆動電流 $I_{op} = 700\text{mA}$ のときに、 1480nm 近傍において3本の発振縦モード出力で 210mW の光出力を得、半値幅 $\Delta\lambda_h$ は、 $0.5 \sim 0.6\text{nm}$ となっている。この場合におけるファーフールドパターン (FFP: Far Field Pattern) の半値幅 (FWHM: Full Width Half Maximum) は、水平方向の半値幅が $16 \sim 18$ 度であり、垂直方向の半値幅が $21 \sim 24$ 度となる。

【0060】

ここで、この実施の形態1における回折格子13の構成について詳述する。上述したように、発振縦モード数は複数であることがラマン増幅器の励起用光源として適切である。そこで、回折格子13の長さが発振縦モード数に与える影響について考察した。図8は、共振器長 L が $1300\ \mu\text{m}$ のときにおける回折格子長 L_g に対する発振縦モード数の関係を示す図である。図8では、回折格子長 L_g が $400\ \mu\text{m}$ のときに、1本の発振縦モード数で発振 (単一縦モード発振) を行っており、回折格子長 L_g が $200\ \mu\text{m}$ のときに、 $1 \sim 3$ 本の発振縦モード数で発振し、回折格子長 L_g が $300\ \mu\text{m}$ のときに、 $2 \sim 4$ 本の発振縦モード数で発振している。したがって、回折格子長 L_g が $100\ \mu\text{m}$ のときに、確実に2本以上の発振縦モードで発振しているが、傾向として回折格子長 L_g が $200\ \mu\text{m}$ 以下で2本以上の発振縦モード数となることを示している。

【0061】

この場合、図8では、回折格子13の結合係数 κ_i の値を、 11cm^{-1} と20

cm^{-1} とのときに求めているが、回折格子長 L_g に対する発振縦モード数は、結合係数 κ_i には無関係であり、ともに一致した特性を示している。したがって、共振器長 L が $1300\ \mu\text{m}$ のとき、回折格子長 L_g を $300\ \mu\text{m}$ 以下、好ましくは $200\ \mu\text{m}$ 以下、さらに好ましくは $100\ \mu\text{m}$ 以下とすることによって、複数本の発振縦モードを得ることができる。

【0062】

ところで、共振器長 L の長短に比例して発振縦モード間隔も変化するため、回折格子長 L_g は、共振器長 L に比例した値となる。すなわち、回折格子長 L_g : 共振器長 $L = 300 : 1300$ の関係を維持するため、回折格子長 L_g が $300\ \mu\text{m}$ 以下で複数の発振縦モードが得られる関係は、

$$L_g \times (1300\ (\mu\text{m}) / L) \leq 300\ (\mu\text{m})$$

として拡張することができる。

【0063】

さらに、この実施の形態1では、結合係数 κ_i と回折格子長 L_g との関係について考察した。まず、図9は、GRIN-SCH-MQW活性層3と回折格子13との配置関係を示しており、GRIN-SCH-MQW活性層3は、MQW層3bがGRIN-SCH層3a、3cに挟まれた構造となっている。図8において、回折格子13の回折格子長は「 L_g 」 (μm) であり、回折格子の厚さは「 t_{gr} 」 (nm) であり、回折格子13とGRIN-SCH層3aとの間の厚さは「 d_{sp} 」 (nm) であり、回折格子13の結合係数は「 κ_i 」 (cm^{-1}) であり、回折格子組成波長は「 λ_{gr} 」 (μm) である。なお、回折格子組成波長 λ_{gr} は、 $n\text{-InP}$ 基板1にほぼ格子整合するために、回折格子13を組成する材料のバンドギャップエネルギーに対応した波長である。

【0064】

ここで、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ d_{sp} 、回折格子の厚さ t_{gr} 、回折格子組成波長 λ_{gr} 、結合係数 κ_i を変化させた組み合わせに対して、回折格子長 L_g を $30\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$ と変化させた場合における電流－光出力 ($I-L$) 特性を調べてみた。すなわち、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ $d_{sp} = 200\ \text{nm}$ 、回折格子の厚さ t

gr=20 nm、回折格子組成波長 $\lambda_{gr}=1.1\ \mu\text{m}$ 、結合係数 $\kappa_i=11\ \text{cm}^{-1}$ のときに、回折格子長 L_{gr} を30 μm 、60 μm 、100 μm 、200 μm 、400 μm と変化させた場合と、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ $d_{sp}=200\ \text{nm}$ 、回折格子の厚さ $t_{gr}=20\ \text{nm}$ 、回折格子組成波長 $\lambda_{gr}=1.25\ \mu\text{m}$ 、結合係数 $\kappa_i=20\ \text{cm}^{-1}$ のときに、回折格子長 L_{gr} を30 μm 、60 μm 、100 μm 、200 μm 、400 μm と変化させた場合と、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ $d_{sp}=100\ \text{nm}$ 、回折格子の厚さ $t_{gr}=25\ \text{nm}$ 、回折格子組成波長 $\lambda_{gr}=1.35\ \mu\text{m}$ 、結合係数 $\kappa_i=44\ \text{cm}^{-1}$ のときに、回折格子長 L_{gr} を100 μm 、200 μm 、400 μm と変化させた場合とについて考察した。なお、共振器長 L は、1300 μm である。

【0065】

図10は、この場合におけるI-L（駆動電流 I_{op} に対する光出力 P_o ）特性の判定結果を示す図である。結果として、結合係数 $\kappa_i=11\ \text{cm}^{-1}$ のときにおいて回折格子長 L_g が60 μm および100 μm のときに、良好なI-L特性を示し、結合係数 $\kappa_i=20\ \text{cm}^{-1}$ のときにおいて回折格子長 L_g が30 μm および60 μm のときに良好なI-L特性を示し、その他の場合においては、良好なI-L特性は得られなかった。なお、結合係数 $\kappa_i=11\ \text{cm}^{-1}$ のときにおいて回折格子長 L_g が200 μm のときと、結合係数 $\kappa_i=20\ \text{cm}^{-1}$ のときにおいて回折格子長 L_g が100 μm のときには、やや良好なI-L特性が得られた。

【0066】

ここで、良好なI-L特性が得られないときは、キックが多いことと高出力動作ができないことである。たとえば、図11は、結合係数 κ_i が20 cm^{-1} であって回折格子長 L_g が30 μm のときのI-L特性であり、I-L特性が良好な場合を示し、図12は、結合係数 κ_i が20 cm^{-1} であって回折格子長 L_g が100 μm のときのI-L特性であり、I-L特性がやや良好な場合を示し、図13は、結合係数 κ_i が11 cm^{-1} であって回折格子長 L_g が400 μm のときのI-L特性であり、I-L特性が不良な場合を示している。なお、図11～図13では、各I-L特性の変化をわかりやすくするため、I-L曲線LP1～LP3の1次微分である微分曲線SE1～SE3も併せて示している。

【0067】

図11に示した良好はI-L特性は、数十mAから1500mA程度まで、大きなキンクが発生しておらず、駆動電流 I_{op} が1200mA近傍で約400mWの高出力かつ高効率動作を可能としている。これに対し、図12に示したやや良好でないI-L特性は、駆動電流 I_{op} が900mAおよび1200mA近傍でキンクK1、K2を発生し、不安定な発振動作を示している。さらに、図13に示した不良なI-L特性は、駆動電流が900mA近傍で大きなキンクK3を発生し、非常に不安定な発振動作を示している。

【0068】

ここで注目すべきことは、結合係数 κ_i が、回折格子13の屈折率変化と回折格子層での光閉じ込め係数 Γ_g との関数で表され、さらに光閉じ込め係数 Γ_g は、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ d_{sp} 、回折格子の厚さ t_{gr} 、回折格子組成波長 λ_{gr} などをパラメータとする関数で表され、結果的に、結合係数 κ_i は、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ d_{sp} 、回折格子の厚さ t_{gr} 、回折格子組成波長 λ_{gr} などをパラメータとする関数で表されることである。すなわち、結合係数 κ_i は、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ d_{sp} 、回折格子の厚さ t_{gr} 、回折格子組成波長 λ_{gr} などによって依存する値であり、逆に、これらを代表する値であるとも言える。

【0069】

そこで、図9に示した結果を考察すると、結合係数 κ_i と回折格子長 L_g との積である無次元の「 $\kappa_i \cdot L_g$ 」によってI-L特性を評価できることになる。図10では、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.06」と「0.1」と「0.12」のときにI-L特性が良好であり、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.2」のときに、やや良好でないI-L特性が得られ、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.4」以上のときに、不良なI-L特性が得られている。この結果から、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.3」程度以下のときに良好なI-L特性が得られ、特に積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.1」のときに最適なI-L特性が得られ、低雑音特性と広いダイナミックレンジが得られる。ここで、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.2」のときに、やや良好でないI-L特性であり、キンクの発生によって発振波長がシフトするなどによって波長安定性が阻害されるが、このような波長不安

定性は、たとえば温度制御などを行って波長安定制御を行うことによって解消される。このような波長安定制御を行うことによって、I-L曲線LP2から、リンクK1, K2がなくなり、良好なI-L特性を示すことになる。なお、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.03」と非常に小さい場合には、波長の引き込みが十分に行えず、波長選択性が劣化するため、実用に耐えない。

【0070】

図14は、良好なI-L特性を示した半導体レーザ装置の積 $\kappa_i \cdot L_g$ に対する光出力の関係を示し、各プロットは、駆動電流 I_{op} を600mA与えたときの積 $\kappa_i \cdot L_g$ に対する光出力の関係を示している。ここで、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.1」のときに光出力が最大値「260」mWを示し、つぎに、大きな値を示すのは積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.06」のときであり、このときの光出力は「243」mWである。また、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.1」以上になると、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が大きくなるに従って、順次光出力が低下する傾向がある。したがって、積 $\kappa_i \cdot L_g$ が「0.1」のときが最適であるといえ、安定し、かつ高効率動作が実現される。

【0071】

逆に、このことから、積 $\kappa_i \cdot L_g$ の値が一定値を満足するのであれば、結合係数 κ_i と回折格子長 L_g とを任意に設定することができる。また、上述したように、結合係数 κ_i は、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ d_{sp} 、回折格子の厚さ t_{gr} 、回折格子組成波長 λ_{gr} などによって依存する値であるため、これらの値も任意に設定することができる。たとえば、図15に示すように、これらの各パラメータを適切に設定した回折格子13を構成することができる。この場合、積 $\kappa_i \cdot L_g$ の値は、最適な「0.1」あるいは準最適な「0.05」となるように設定している。

【0072】

たとえば、結合係数 κ_i を「24.4」(cm^{-1})、回折格子長 L_g を「40」(μm)とし、積 $\kappa_i \cdot L_g$ を「0.0976 \div 0.10」に設定すると良好なI-L特性が得られる。この場合、回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ d_{sp} を「50」(nm)、回折格子の厚さ t_{gr} を「30」(nm)、回折格子組成波長 λ_{gr} を「1.1」(μm)としている。

【0073】

この実施の形態1によれば、回折格子13をGRIN-SCH-MQW活性層3の近傍であって、出射側反射膜15側に設け、発振波長が1100～1550 μm の場合であって、共振器長Lが1300 μm の場合、回折格子長 L_g を300 μm 以下とすることによって、発振波長スペクトル内に複数本の発振縦モードを得ることができるので、ラマン増幅器用の励起用光源として用いた場合に、誘導ブリルアン散乱を発生せずに、安定かつ高いラマン利得を得ることができる。

【0074】

特に、結合係数 κ_i と回折格子長 L_g との積 $\kappa_i \cdot L_g$ の値を0.3以下、好ましくは0.2以下、さらに好ましくは0.1以下とすることによって、大きなキンクが少なく、広いダイナミックレンジをもつI-L特性を得ることができ、高効率かつ高出力動作の半導体レーザ装置を実現できる。

【0075】

また、ファイバグレーティングを用いた半導体レーザモジュールのように、ファイバグレーティングをもつ光ファイバと半導体発光素子との光結合を共振器内において行わないので、組立が容易となり、機械的振動などによる不安定出力を回避することができる。

【0076】

なお、活性層に沿って、回折格子が形成されている半導体レーザ装置に限らず、活性層に隣接する光導波路を有する半導体レーザ装置においても、同様に適用することができるのは明らかである。

【0077】

(実施の形態2)

つぎに、この発明の実施の形態2について説明する。上述した実施の形態1では、回折格子13が中心波長に対して揺らぎを持つ波長選択性によって、複数本の発振縦モードを出力するようにしていたが、この実施の形態2では、回折格子13に対して積極的に揺らぎをもたせ、発振縦モードの数を増やすことができる半導体レーザ装置を得るようにしている。

【0078】

図 1 6 は、この発明の実施の形態 2 である半導体レーザ装置の構成を示す縦断面図である。また、図 1 7 は、異なる周期 Λ_1 、 Λ_2 の回折格子を有する半導体レーザ装置の発振波長スペクトルを示す図である。図 1 7 において、回折格子 1 3 a は、波長 λ_1 の発振波長スペクトルを形成し、この発振波長スペクトル内に 3 本の発振縦モードを選択する。一方、回折格子 1 3 b は、波長 λ_2 の発振波長スペクトルを形成し、この発振波長スペクトル内に 3 本の発振縦モードを選択する。したがって、回折格子 1 3 a、1 3 b による複合発振波長スペクトル 4 0 は、個々の発振波長スペクトルの半値幅 $\Delta \lambda_h$ よりも広がった半値幅 $\Delta \lambda_{h'}$ を有し、この複合発振波長スペクトル 4 0 内に 4 ～ 5 本の発振縦モードが含まれることになる。この結果、単一の発振波長スペクトルを形成するときに比べ、一層多くの発振縦モードを容易に選択出力することができ、光出力の増大をもたらすことができる。

【 0 0 7 9 】

具体的には、図 1 6 に示した半導体レーザ装置によって実現される。図 1 6 において、この半導体レーザ装置では、実施の形態 1 に示した回折格子 1 3 に代わって、2 つの回折格子 1 3 a、1 3 b が設けられる。なお、共振器長 L は、1 3 0 0 μm である。その他の構成は、実施の形態 1 と同じであり、同一構成部分には同一符号を付している。回折格子 1 3 a は、活性層 3 に沿って長さ 5 0 μm であって波長 λ_1 の波長選択性を有し、回折格子 1 3 b は、活性層 3 に沿って長さ 5 0 μm であって波長 λ_2 の波長選択性を有する。回折格子 1 3 a は、出射側反射膜 1 5 近傍に設けられ、回折格子 1 3 b は、回折格子 1 3 a の反射膜 1 4 側端面と距離 1 μm をおいて反射膜 1 4 側に設けられる。波長 λ_1 を選択する回折格子 1 3 a の周期 Λ_1 と、波長 λ_2 を選択する回折格子 1 3 b の周期 Λ_2 との関係は、

$$\Lambda_1 = \Lambda_2 + 0.2 \text{ (nm)}$$

であり、周期 Λ_1 、 Λ_2 は、1 4 8 0 nm 近傍の値である。なお、回折格子 1 3 a の出射側反射膜 1 5 側端面と出射側反射膜 1 5 との間は、接することが望ましいが、必ずしも接する配置にしなくても、回折格子 1 3 a、1 3 b の機能を発揮する範囲内、たとえば 2 0 μm ～ 1 0 0 μm 程度の範囲内で出射側反射膜 1 5 から

離隔する配置としてもよい。また、半導体レーザ装置20の製造時における半導体レーザ装置20の劈開位置のばらつきなどによって、回折格子13bの一部が反射膜14側に残っていてもよい。

【0080】

また、図18は、図16に示した回折格子13a, 13bを設けた場合におけるI-L特性の結果を示す図である。なお、ここでは、各回折格子13a, 13bの長さが50 μ mであるため、回折格子長Lgが100 μ mの場合と比較している。図18において、結合係数 κ_i と回折格子長Lgとの積 $\kappa_i \cdot Lg$ が「0.2」のとき、I-L特性はやや良好であったが、この回折格子13a, 13bを用いると、I-L特性が良好になり、キンクの発生がなく、安定した発振動作と高効率動作とを確実にすることができる。なお、この場合における発振縦モード本数は、4本であった。

【0081】

なお、回折格子に大きな揺らぎを与える態様には次のようなものがある。図19は、この発明の実施の形態2である半導体レーザ装置の応用例の構成を示す縦断面図である。図19において、回折格子47は、活性層3に沿って、出射側反射膜15側に設けられ、そのグレーティング周期を周期的に変化させたチャープドグレーティングであり、この回折格子47の波長選択性に揺らぎを発生させ、発振波長スペクトルの半値幅 $\Delta\lambda_h$ を広げ、半値幅 $\Delta\lambda_h$ 内の発振縦モードの本数を増大するようにしている。その他の構成は、実施の形態1と同じであり、同一構成部分には同一符号を付している。

【0082】

図20は、回折格子47のグレーティング周期の周期的変化を示す図である。図20に示すように、回折格子47は、平均周期が220nmであり、 ± 0.02 nmの周期揺らぎ（偏差）を周期Cで繰り返す構造を有している。この ± 0.02 nmの周期揺らぎによって、発振波長スペクトルの半値幅 $\Delta\lambda_h$ 内に3～6本程度の発振縦モードをもたせることができる。

【0083】

なお、回折格子47の構成としては、一定の周期Cでグレーティング周期を変

化させるチャープドグレーティングに限らず、グレーティング周期を、周期 Λ_1 ($220\text{ nm}+0.02\text{ nm}$) と周期 Λ_2 ($220\text{ nm}-0.02\text{ nm}$) との間でランダムに変化させるようにしてもよい。

【0084】

さらに、図21 (a) に示すように、周期 Λ_1 と周期 Λ_2 とを一回ずつ交互に繰り返す回折格子として、周期揺らぎを持たせるようにしてもよい。また、図21 (b) に示すように、周期 Λ_1 と周期 Λ_2 とをそれぞれ複数回、交互に繰り返す回折格子として、周期揺らぎを持たせるようにしてもよい。さらに、図21 (c) に示すように、連続する複数回の周期 Λ_1 と連続する複数回の周期 Λ_2 とをもつ回折格子として、周期揺らぎを持たせるようにしてもよい。また、周期 Λ_1 と周期 Λ_2 との間の離散的な異なる値をもつ周期を補完して配置するようにしてもよい。

【0085】

この実施の形態2では、実施の形態1と同様に、適切な回折格子長 L_g と、積 $\kappa_i \cdot L_g$ とを持たせることによって良好なI-L特性をもたせるとともに、回折格子47に大きな揺らぎを設け、複合発振波長スペクトルの半値幅 $\Delta\lambda_h$ を広げ、さらに多くの発振縦モードを持たせるようにし、高出力かつ安定した半導体レーザ装置を実現している。

【0086】

(実施の形態3)

つぎに、この発明の実施の形態3について説明する。この実施の形態3では、上述した実施の形態1, 2で示した半導体レーザ装置をモジュール化したものである。

【0087】

図22は、この発明の実施の形態3である半導体レーザモジュールの構成を示す縦断面図である。図22において、この半導体レーザモジュール50は、上述した実施の形態1, 2で示した半導体レーザ装置に対応する半導体レーザ装置51を有する。半導体レーザモジュール50の筐体として、セラミックなどによって形成されたパッケージ59の内部底面上に、温度制御装置としてのペルチェ素

子58が配置される。ペルチェ素子58上にはベース57が配置され、このベース57上にはヒートシンク57aが配置される。ペルチェ素子58には、図示しない電流が与えられ、その極性によって冷却および加熱を行うが、半導体レーザ装置51の温度上昇による発振波長ずれを防止するため、主として冷却器として機能する。すなわち、ペルチェ素子58は、レーザ光が所望の波長に比して長い波長である場合には、冷却して低い温度に制御し、レーザ光が所望の波長に比して短い波長である場合には、加熱して高い温度に制御する。この温度制御は、具体的に、ヒートシンク57a上であって、半導体レーザ装置51の近傍に配置されたサーミスタ58aの検出値をもとに制御され、図示しない制御装置は、通常、ヒートシンク57aの温度が一定に保たれるようにペルチェ素子58を制御する。また、図示しない制御装置は、半導体レーザ装置51の駆動電流を上昇させるに従って、ヒートシンク57aの温度が下がるようにペルチェ素子58を制御する。このような温度制御を行うことによって、半導体レーザ装置51の波長安定性を向上させることができ、歩留まりの向上にも有効となる。なお、ヒートシンク57aは、たとえばダイヤモンドなどの高熱伝導率をもつ材質によって形成することが望ましい。これは、ヒートシンク57aがダイヤモンドで形成されると、高電流印加時の発熱が抑制されるからである。

【0088】

ベース57上には、半導体レーザ装置51およびサーミスタ58aを配置したヒートシンク57a、第1レンズ52、および電流モニタ56が配置される。半導体レーザ装置51から出射されたレーザ光は、第1レンズ52、アイソレータ53、および第2レンズ54を介し、光ファイバ55上に導波される。第2レンズ54は、レーザ光の光軸上であって、パッケージ59上に設けられ、外部接続される光ファイバ55に光結合される。なお、電流モニタ56は、半導体レーザ装置51の反射膜側から漏れた光をモニタ検出する。

【0089】

ここで、この半導体レーザモジュール50では、他の光学部品などによる反射戻り光が共振器内に戻らないように、半導体レーザ装置51と光ファイバ55との間にアイソレータ53を介在させている。このアイソレータ53には、ファイ

バグレーティングを用いた従来の半導体レーザモジュールと異なり、インライン式のファイバ型でなく、半導体レーザモジュール 5 0 内に内蔵できる偏波無依存型のアイソレータを用いることができるため、アイソレータによる挿入損失を小さく、さらに低い相対強度雑音 (R I N) を達成することができ、部品点数も減らすことができる。

【 0 0 9 0 】

この実施の形態 3 では、実施の形態 1, 2 で示した半導体レーザ装置をモジュール化しているため、偏波無依存型のアイソレータを用いることができ、挿入損失を小さくすることができ、低雑音化および部品点数の減少を促進することができる。

【 0 0 9 1 】

(実施の形態 4)

つぎに、この発明の実施の形態 4 について説明する。この実施の形態 4 では、上述した実施の形態 3 に示した半導体レーザモジュールをラマン増幅器に適用したものである。

【 0 0 9 2 】

図 2 3 は、この発明の実施の形態 4 であるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。このラマン増幅器は、WDM通信システムに用いられる。図 2 3 において、このラマン増幅器は、上述した実施の形態 3 に示した半導体レーザモジュールと同一構成の半導体レーザモジュール 6 0 a ～ 6 0 d を用い、図 2 7 に示した半導体レーザモジュール 1 8 2 a ～ 1 8 2 d を、上述した半導体レーザモジュール 6 0 a ～ 6 0 d に置き換えた構成となっている。

【 0 0 9 3 】

各半導体レーザモジュール 6 0 a, 6 0 b は、偏波面保持ファイバ 7 1 を介して、複数の発振縦モードを有するレーザ光を偏波合成カップラ 6 1 a に出力し、各半導体レーザモジュール 6 0 c, 6 0 d は、偏波面保持ファイバ 7 1 を介して、複数の発振縦モードを有するレーザ光を偏波合成カップラ 6 1 b に出力する。ここで、半導体レーザモジュール 6 0 a, 6 0 b が発振するレーザ光は、同一波長である、また、半導体レーザモジュール 6 0 c, 6 0 d が発振するレーザ光は、同

一波長であるが半導体レーザモジュール60a, 60bが発振するレーザ光の波長とは異なる。これは、ラマン増幅が偏波依存性を有するためであり、偏波合成カプラ61a, 61bによって偏波依存性が解消されたレーザ光として出力するようにしている。

【0094】

各偏波合成カプラ61a, 61bから出力された異なる波長をもったレーザ光は、WDMカプラ62によって合成され、合成されたレーザ光は、WDMカプラ65を介してラマン増幅用の励起光として増幅用ファイバ64に出力される。この励起光が入力された増幅用ファイバ64には、増幅対象の信号光が入力され、ラマン増幅される。

【0095】

増幅用ファイバ64内においてラマン増幅された信号光（増幅信号光）は、WDMカプラ65およびアイソレータ66を介してモニタ光分配用カプラ67に入力される。モニタ光分配用カプラ67は、増幅信号光の一部を制御回路68に出力し、残りの増幅信号光を出力レーザ光として信号光出力ファイバ70に出力する。

【0096】

制御回路68は、入力された一部の増幅信号光をもとに各半導体レーザモジュール60a～60dのレーザ出力状態、たとえば光強度を制御し、ラマン増幅の利得帯域が平坦な特性となるようにフィードバック制御する。

【0097】

この実施の形態3に示したラマン増幅器では、たとえば図27に示した半導体発光素子180aとファイバグレーティング181aとが偏波面保持ファイバ71aで結合された半導体レーザモジュール182aを用いず、実施の形態1, 2で示した半導体レーザ装置が内蔵された半導体レーザモジュール60aを用いるようにしているので、偏波面保持ファイバ71aの使用を削減することができる。なお、上述したように、各半導体レーザモジュール60a～60dは、複数の発振縦モードを有しているため、偏波面保持ファイバ長を短くすることができる。この結果、ラマン増幅器の小型軽量化とコスト低減を実現することができる。

【0098】

なお、図23に示したラマン増幅器では、偏波合成カップラ61a、61bを用いているが、図24に示すように半導体レーザモジュール60a、60cから、それぞれ偏波面保持ファイバ71を介して直接WDMカップラ62に光出力するようにしてもよい。この場合、半導体レーザモジュール60a、60cの偏波面は、偏波面保持ファイバ71に対して45度となるように入射する。これによって、偏波面保持ファイバ71から出力される光出力の偏波依存性がなくすることができ、一層、小型かつ部品点数の少ないラマン増幅器を実現することができる。

【0099】

また、半導体レーザモジュール60a～60d内に内蔵される半導体レーザ装置として実施の形態2に示した半導体レーザ装置を用いると、発振縦モード数が多いため、必要な偏波面保持ファイバ71の長さを短くすることができる。特に、発振縦モードが4、5本になると、急激に、必要な偏波面保持ファイバ71の長さが短くなるため、ラマン増幅器の簡素化と小型化を促進することができる。さらに、発振縦モードの本数が増大すると、コヒーレント長が短くなり、デポラライズによって偏光度(DOP: Degree Of Polarization)が小さくなり、偏波依存性をなくすることが可能となり、これによっても、ラマン増幅器の簡素化と小型化とを一層促進することができる。

【0100】

また、上述した実施の形態1、2が有する作用効果をラマン増幅器に与えることができる。たとえば、ファイバグレーティングを用いた半導体レーザモジュールに比して相対強度雑音(RIN)を低減することができるので、ラマン利得の揺らぎを抑えることができ、安定したラマン増幅を行うことができる。たとえば、図25は、半導体レーザ装置に対する駆動電流 I_{op} が300mA以上のときに、周波数0.1～15GHzの信号光を増幅した場合の相対強度雑音を示す雑音スペクトル図である。図25に示すように、相対強度雑音は、 -150 dB/Hz 以下であり、低雑音化が促進されたラマン増幅器を実現している。

【0101】

さらに、このラマン増幅器では、ファイバグレーティングを用いた半導体レー

ザモジュールに比して光軸合わせが容易であり、組立性が向上し、共振器内に機械的な光結合がないため、この点からも、ラマン増幅の安定性、信頼性を高めることができる。

【0102】

さらに、上述した実施の形態1、2の半導体レーザ装置では、複数の発振モードを有しているため、誘導ブリルアン散乱を発生させずに、高出力の励起光を発生することができるので、安定し、かつ高いラマン利得を得ることができる。

【0103】

また、図23および図24に示したラマン増幅器は、後方励起方式であるが、上述したように、半導体レーザモジュール60a～60dが安定した励起光を出力するため、前方励起方式であっても、双方向励起方式であっても、安定したラマン増幅を行うことができる。

【0104】

この図23あるいは図24に示したラマン増幅器は、上述したようにWDM通信システムに適用することができる。図26は、図23あるいは図24に示したラマン増幅器を適用したWDM通信システムの概要構成を示すブロック図である。

【0105】

図26において、複数の送信機Tx1～Txnから送出された波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光信号は、光合波器80によって合波され、1つの光ファイバ85に集約される。この光ファイバ85の伝送路上には、図23あるいは図24に示したラマン増幅器に対応した複数のラマン増幅器81、83が距離に応じて配置され、減衰した光信号を増幅する。この光ファイバ85上を伝送した信号は、光分波器84によって、複数の波長 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ の光信号に分波され、複数の受信機Rx1～Rxnに受信される。なお、光ファイバ85上には、任意の波長の光信号を付加し、取り出したりするADM (Add/Drop Multiplexer) が挿入される場合もある。

【0106】

なお、上述した実施の形態4では、実施の形態1、2に示した半導体レーザ装置あるいは実施の形態3に示した半導体レーザモジュールを、ラマン増幅用の励

起光源に用いる場合を示したが、これに限らず、たとえば、980nm, 1480nmなどのEDFA励起用光源として用いることができるのは明らかである。

【0107】

【発明の効果】

以上説明したように、請求項1の発明によれば、レーザ光の出射端面に設けた第1反射膜と該レーザ光の反射端面に設けた第2反射膜との間に形成された活性層の近傍であって前記第1反射膜側に回折格子を部分的に設け、前記活性層を挟む前記第1反射膜と前記第2反射膜とによって形成される光共振器の共振器長と前記回折格子の波長選択特性とを含む発振パラメータの組み合わせ設定によって発振波長スペクトルの半値幅内に2本以上の発振縦モードを含むレーザ光を出力するようにしているので、ファイバグレーティングを用いた半導体レーザ装置に比して、共振器内に雑音が入り込む余地がないため、相対強度雑音が、周波数0.1～10GHzにおいて－150dB/Hz程度まで低減され、ラマン増幅器に用いた場合に安定したラマン増幅を行うことができるという効果を奏する。

【0108】

また、共振器が物理的に分離されていないため、光軸合わせなどを行う必要がなく、組立が容易になるとともに、機械的振動などによってレーザの発振特性が変化しにくくなり、安定したレーザ光を信頼性高く出力することができ、ラマン増幅器に用いた場合に安定かつ信頼性の高いラマン増幅を行うことができるという効果を奏する。

【0109】

さらに、複数の発振縦モードの存在によって光出力ピーク値を抑えて、光出力パワーを増大させることができ、ラマン増幅器に用いた場合に、誘導ブリルアン散乱を抑えつつ、高いラマン増幅を行うことができるという効果を奏する。

【0110】

また、複数の発振縦モードの存在によって、偏光度が小さくなり、偏波面保存ファイバ長を短くすることができ、小型軽量化を促進できるとともに、コストを低減することができるという効果を奏する。

【0111】

また、請求項2の発明によれば、前記回折格子の第1反射膜側端面は、該第1反射膜に接合するようにしているので、レーザ光出射時の波長選択を確実にかつ効率的行うことができるという効果を奏する。

【0112】

また、請求項3の発明によれば、前記回折格子の回折格子長を $300\mu\text{m}$ 以下としているので、複数の発振縦モードを容易に生成でき、かつ光出力の効率を向上させることができるという効果を奏する。

【0113】

また、請求項4の発明によれば、前記回折格子の回折格子長を、前記共振器長の $(300/1300)$ 倍の値以下としているので、任意の共振器長に対しても、複数の発振縦モードを容易に生成でき、かつ高出力の光出力効率を向上させることができるという効果を奏する。

【0114】

また、請求項5の発明によれば、前記回折格子の結合係数と回折格子長との乗算値を0.3以下の小さな値として駆動電流－光出力特性の線形性を良好にしているので、駆動電流－光出力特性上のキンクの発生を抑えることができ、安定したレーザ光を出力することができるという効果を奏する。

【0115】

また、請求項6の発明によれば、前記回折格子に、グレーティング周期に所定の周期揺らぎを持たせたるようにし、これによって、発振波長スペクトルの半値幅を広げるようにしているので、発振波長スペクトルの半値幅内に含まれる発振縦モード数の増大を容易に行うことができ、安定かつ高効率の半導体レーザ装置を実現することができるという効果を奏する。

【0116】

また、請求項7の発明によれば、前記回折格子を、前記グレーティング周期をランダムあるいは所定周期で変化させたグレーティングとし、これによって、回折格子に周期的揺らぎを発生させ、発振波長スペクトルの半値幅を広げるようにしているので、発振波長スペクトルの半値幅内に含まれる発振縦モード数の増大を容易に行うことができ、安定かつ高効率の半導体レーザ装置を実現することが

できるという効果を奏する。

【0117】

また、請求項8の発明によれば、前記共振器長を、 $800\mu\text{m}$ 以上とし、高出力動作を可能としているので、上述した低雑音特性および駆動電流－光出力特性の良好な線形性を、広いダイナミックレンジで得ることができるという効果を奏する。

【0118】

また、請求項9の発明によれば、ファイバグレーティングを用いない半導体レーザ装置を用いて該半導体レーザ装置の共振器が物理的に分離されていないため、光軸合わせなどを行う必要がなく、半導体レーザモジュールの組立が容易になるとともに、機械的振動などによってレーザの発振特性が変化しにくくなり、安定したレーザ光を信頼性高く、かつ安定して出力することができる半導体レーザモジュールを実現することができるという効果を奏する。

【0119】

また、請求項10の発明によれば、ファイバグレーティングを用いない半導体レーザ装置を用いているため、インライン式のファイバ型と異なり、偏波面無依存型のアイソレータを、ファイバの導波口の前段に挿入することができ、挿入損失の小さい半導体レーザモジュールを実現することができるという効果を奏する。

【0120】

また、請求項11の発明によれば、請求項1～8に記載の半導体レーザ装置、あるいは請求項9または10に記載の半導体レーザモジュールを広帯域ラマン増幅用の励起光源として用い、上述した各半導体レーザ装置あるいは各半導体レーザモジュールの作用効果を奏するようにし、安定かつ光利得のラマン増幅を行うことができるという効果を奏する。

【0121】

また、請求項12の発明によれば、安定した励起光を出力する前記半導体レーザモジュールを用いているので、増幅対象媒体の光ファイバに対して信号光の入射側から励起する前方励起あるいは信号光の出力側から励起する後方励起あるいは

は信号光の入射側および出力側の双方向から励起する双方向励起のいずれかをも行うことができるので、ラマン増幅器を適用するシステムに応じて、励起方式を柔軟に選択することができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】

この発明の実施の形態1である半導体レーザ装置を斜めからみた破断図である。

【図2】

図1に示した半導体レーザ装置の概要構成を示す長手方向の縦断面図である。

【図3】

図2に示した半導体レーザ装置のA-A線断面図である。

【図4】

半導体レーザ装置の劈開位置ばらつきによる回折格子位置の変化を示す図である。

【図5】

図1に示した半導体レーザ装置の発振波長スペクトルと発振縦モードとの関係を示す図である。

【図6】

単一発振縦モードと複数発振縦モードとのレーザ光出力パワーの関係および誘導ブリルアン散乱の閾値を示す図である。

【図7】

発振波長スペクトルの計測結果を示す図である。

【図8】

共振器長1300 μ mのときの回折格子長と発振縦モード本数との関係を示す図である。

【図9】

活性層と回折格子との配置関係を示す図である。

【図10】

回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ、回折格子の厚さ、回折格子組成

波長、結合係数と、回折格子長とを組み合わせた場合における駆動電流－光出力特性の線形性結果を示す図である。

【図11】

良好なI－L特性を示す図である。

【図12】

やや良好なI－L特性を示す図である。

【図13】

不良なI－L特性を示す図である。

【図14】

結合係数と回折格子長との積に対する光出力との関係を示す図である。

【図15】

良好な駆動電流－光出力特性を示す場合における回折格子とGRIN－SCH層との間の厚さ、回折格子の厚さ、回折格子組成波長、結合係数と、回折格子長との組み合わせの一例を示す図である。

【図16】

この発明の実施の形態2である半導体レーザ装置の構成を示す縦断面図である。

【図17】

図16に示した半導体レーザ装置の発振波長スペクトルを示す図である。

【図18】

図16に示した半導体レーザ装置に実施の形態1で示した条件を適用した場合のI－L特性の線形性結果を示す図である。

【図19】

図16に示した半導体レーザ装置の回折格子にチャープドグレーティングを適用した場合の半導体レーザ装置の構成を示す縦断面図である。

【図20】

図19に示したチャープドグレーティングの構成を示す図である。

【図21】

周期揺らぎのあるグレーティングの変形例を示す図である。

【図22】

この発明の実施の形態3である半導体レーザモジュールの構成を示す縦断面図である。

【図23】

この発明の実施の形態4であるラマン増幅器の構成を示すブロック図である。

【図24】

この発明の実施の形態4の応用例を示す図である。

【図25】

駆動電流300mAを加えた場合における周波数0.1～15GHzの相対強度雑音の雑音スペクトルを示す図である。

【図26】

図23あるいは図24に示したラマン増幅器を用いたWDM通信システムの概要構成を示すブロック図である。

【図27】

従来のラマン増幅器の概要構成を示すブロック図である。

【図28】

図27に示したラマン増幅器に用いた半導体レーザモジュールの構成を示す図である。

【符号の説明】

- 1 n-InP基板
- 2 n-InPバッファ層
- 3 GRIN-SCH-MQW活性層
 - 3a SCH層
 - 3b GRIN-MQW層
 - 3c SCH層
- 4 p-InPスペーサ層
- 6 p-InPクラッド層
- 7 InGaAsPキャップ層
- 8 p-InPブロッキング層

- 9 n-InPブロッキング層
- 10 p側電極
- 11 n側電極
- 13, 13a, 13b, 13-1~13-3, 47 回折格子
- 14 反射膜
- 15 出射側反射膜
- 20~22, 51 半導体レーザ装置
- 30 発振波長スペクトル
- 31~33 発振縦モード
- 40 複合発振波長スペクトル
- 50, 60a~60d 半導体レーザモジュール
- 52 第1レンズ
- 53, 63, 66 アイソレータ
- 54 第2レンズ
- 55 光ファイバ
- 56 電流モニタ
- 57 ベース
- 57a ヒートシンク
- 58 ペルチェ素子
- 58a サーミスタ
- 59 パッケージ
- 61a, 61b 偏波合成カプラ
- 62, 65 WDMカプラ
- 64 増幅用ファイバ
- 67 モニタ用光分配カプラ
- 68 制御回路
- 69 信号光入力ファイバ
- 70 信号光出力ファイバ
- 71 偏波面保持ファイバ

81, 83 ラマン増幅器

Lr 共振器長

Lg 回折格子長

κ_i 結合係数

dsp 回折格子とGRIN-SCH層との間の厚さ

tgr 回折格子の厚さ

λ_{gr} 回折格子組成波長

Γ_g 光閉じ込め係数

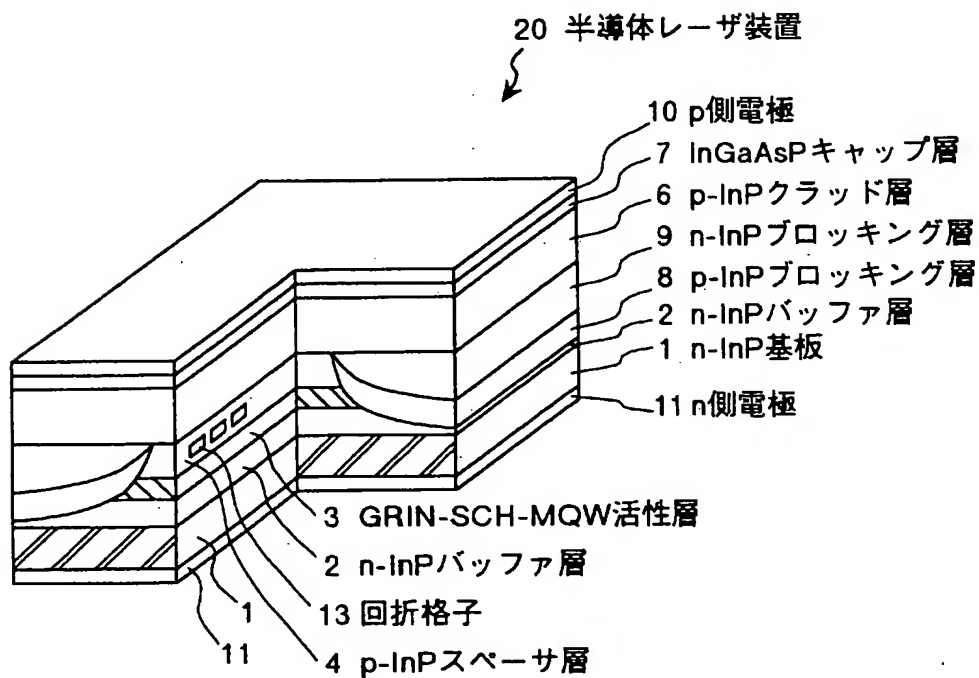
K1~K3 キンク

Pth 閾値

Ct, Ct-1~Ct-3 劈開位置

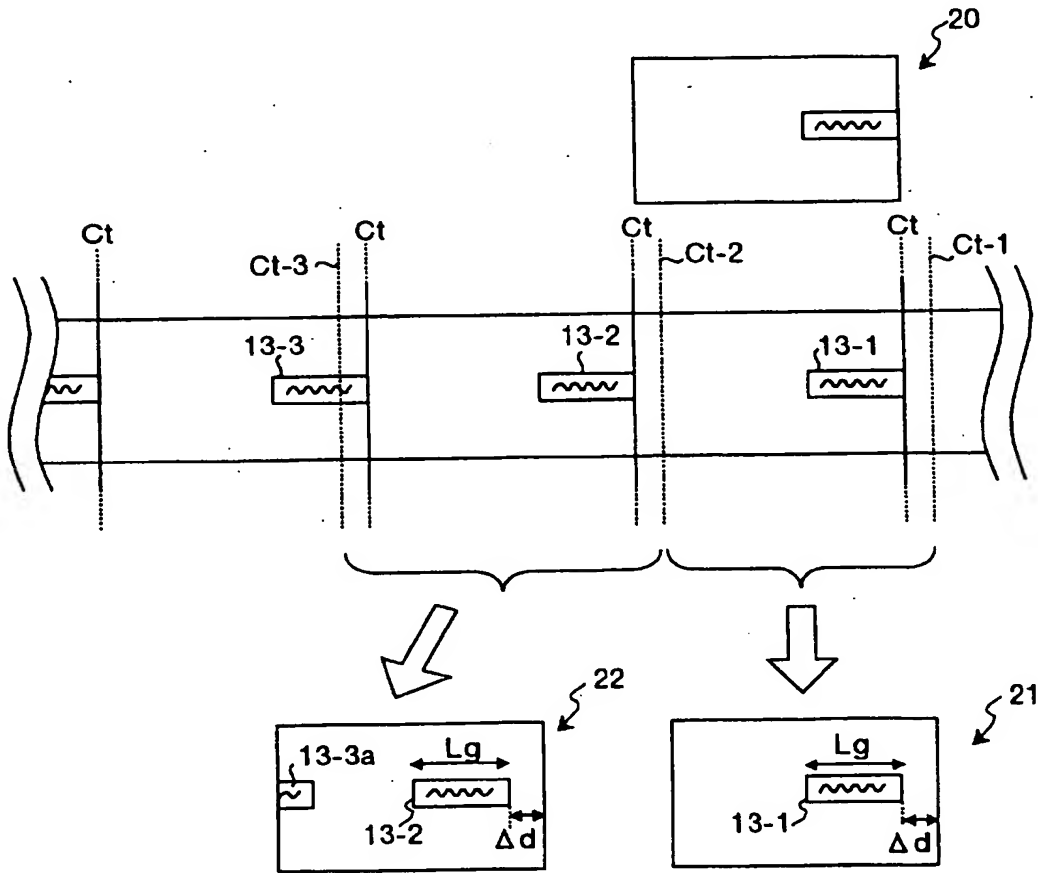
【書類名】 図面

【図1】

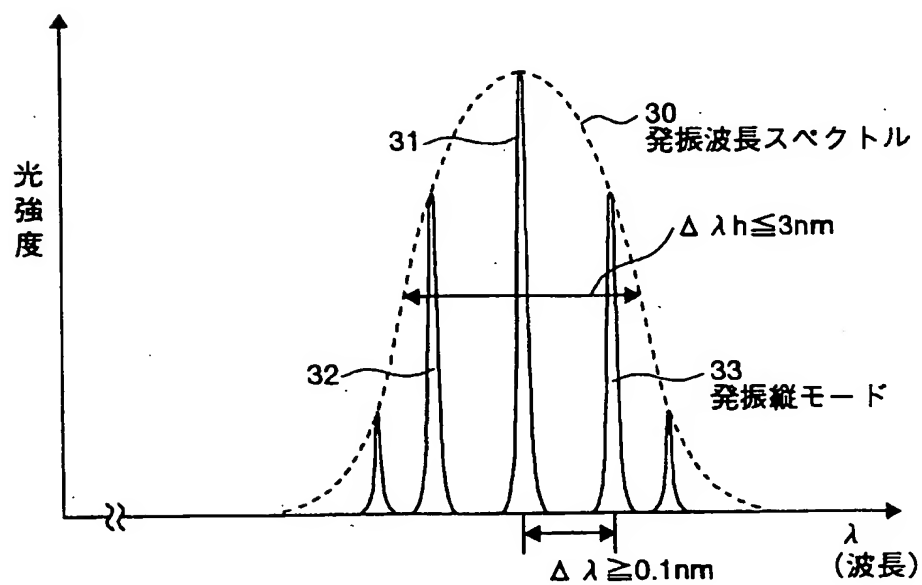


Proof - 2001/05/01

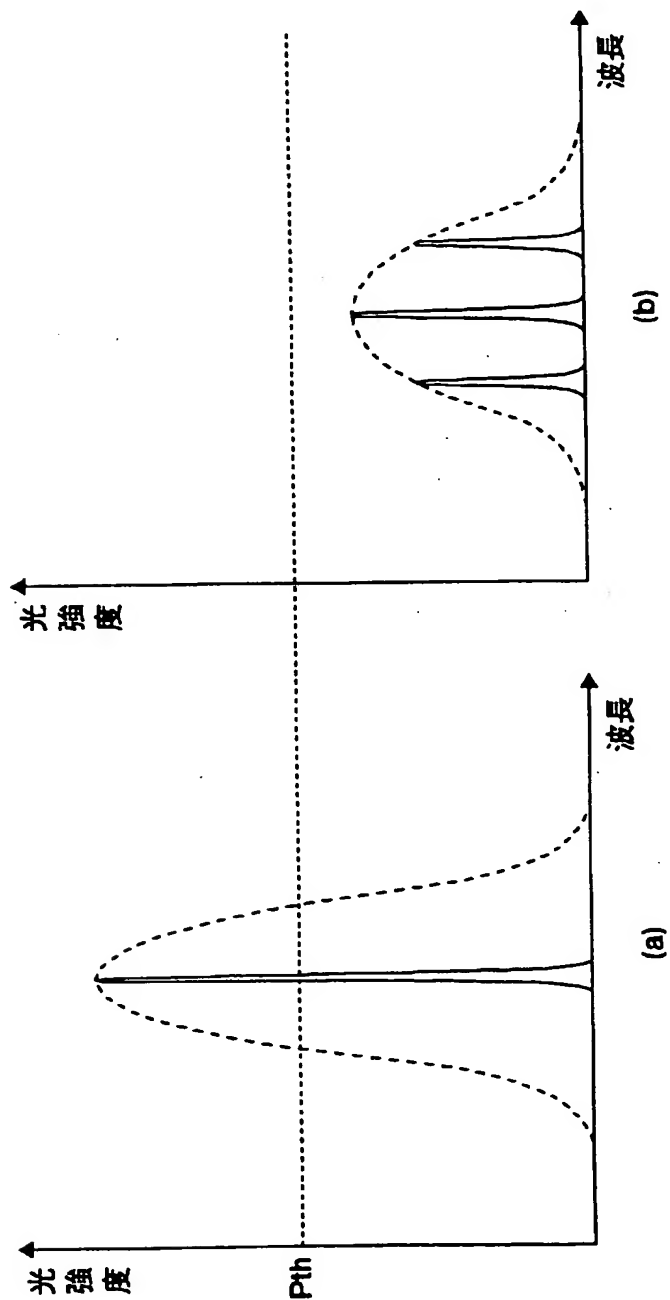
【図4】



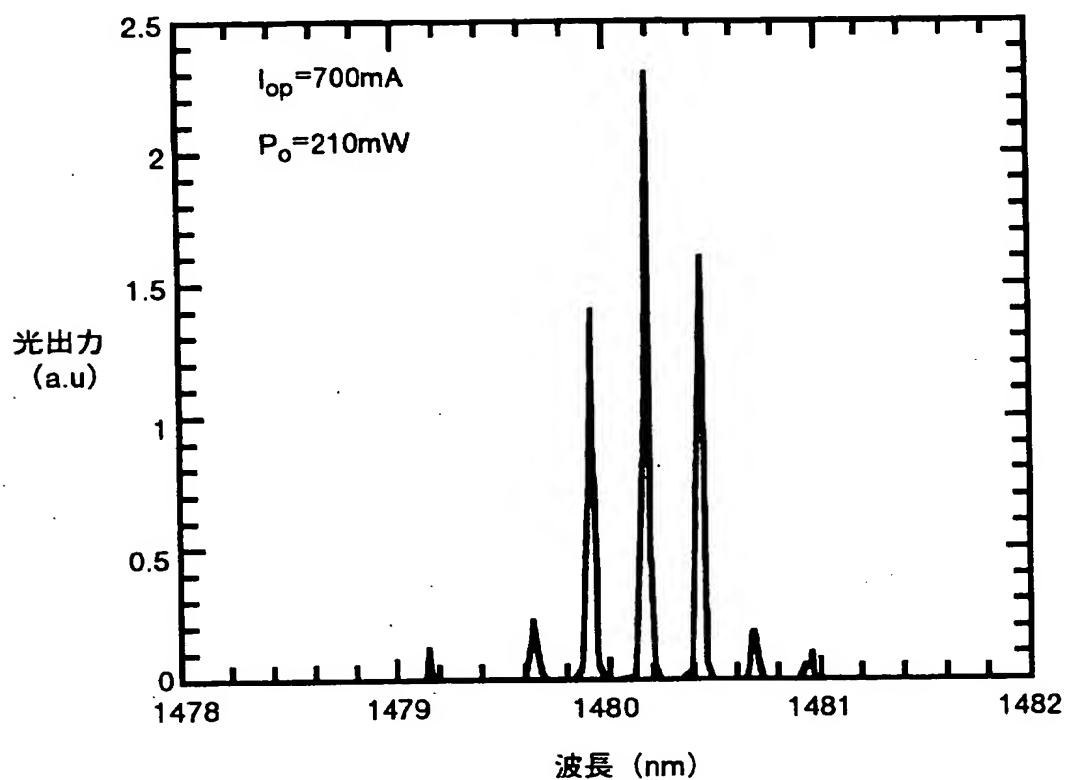
【図5】



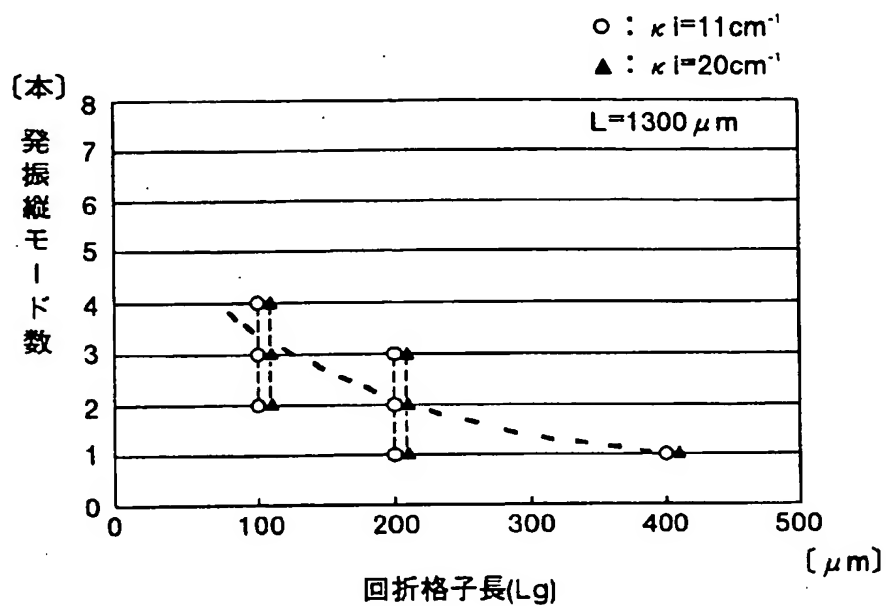
【図6】



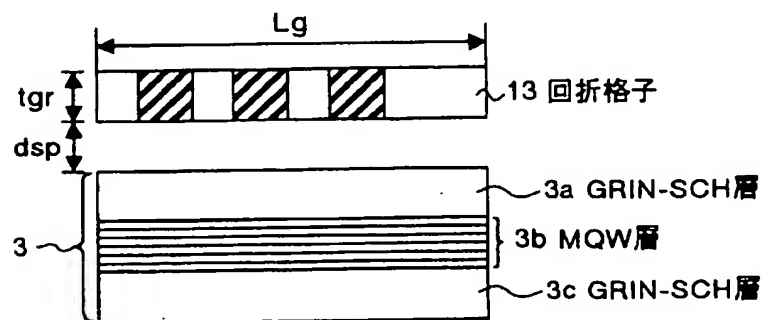
【図7】



【図 8】



【図 9】

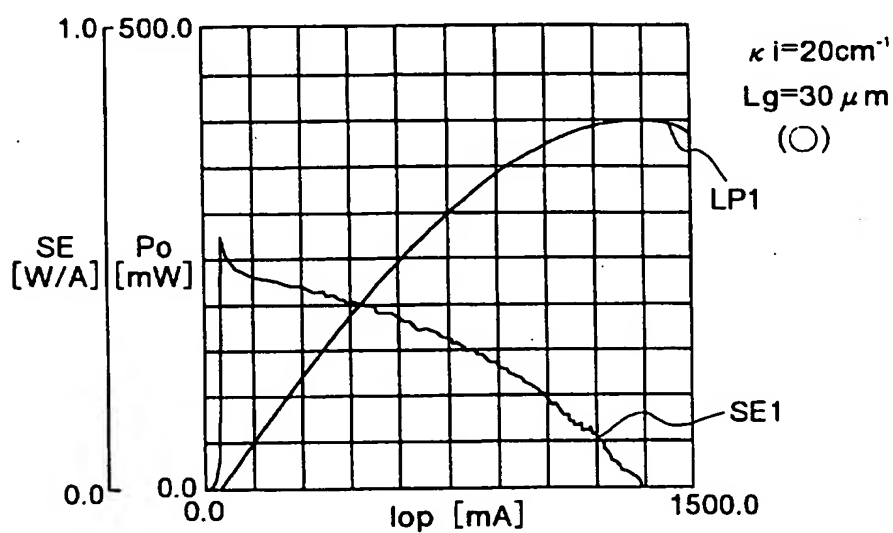


【図10】

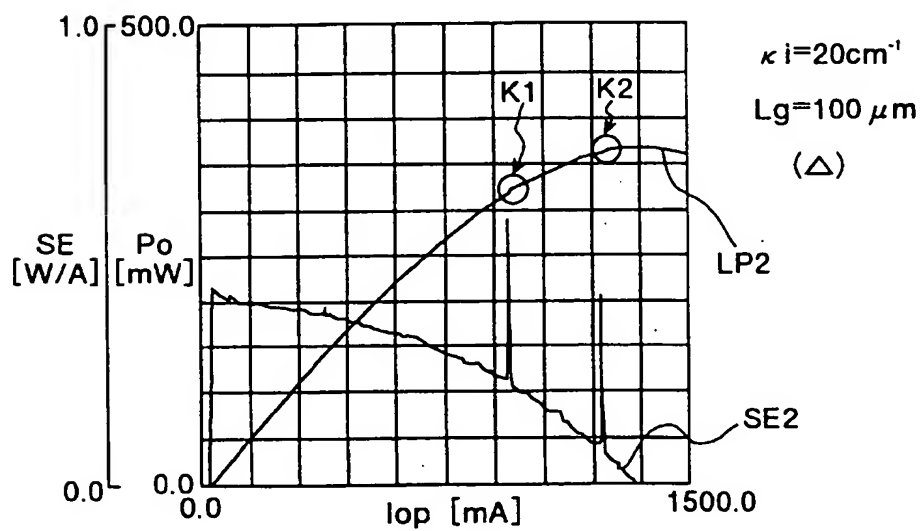
回折格子と GRIN-SCH層との 間の厚さ dsp(nm)	回折格子 の厚さ tgr(nm)	回折格子 組成波長 $\lambda_{gr}(\mu m)$	結合 係数 $\kappa l(cm^{-1})$	回折格子長Lg(μm)				
				30	60	100	200	400
200	20	1.1	11	▲ ($\kappa l_{Lg}=0.03$)	○ ($\kappa l_{Lg}=0.06$)	○ ($\kappa l_{Lg}=0.1$)	△ ($\kappa l_{Lg}=0.2$)	X ($\kappa l_{Lg}=0.4$)
200	20	1.25	20	○ ($\kappa l_{Lg}=0.06$)	○ ($\kappa l_{Lg}=0.12$)	△ ($\kappa l_{Lg}=0.2$)	X ($\kappa l_{Lg}=0.7$)	X ($\kappa l_{Lg}=0.8$)
100	25	1.35	44	—	—	X ($\kappa l_{Lg}=0.4$)	X ($\kappa l_{Lg}=0.8$)	X ($\kappa l_{Lg}=1.6$)

○:I-L特性の線形性が良
 △:I-L特性の線形性がやや良
 X:I-L特性の線形性が不良
 ▲:波長の引き込みが悪い

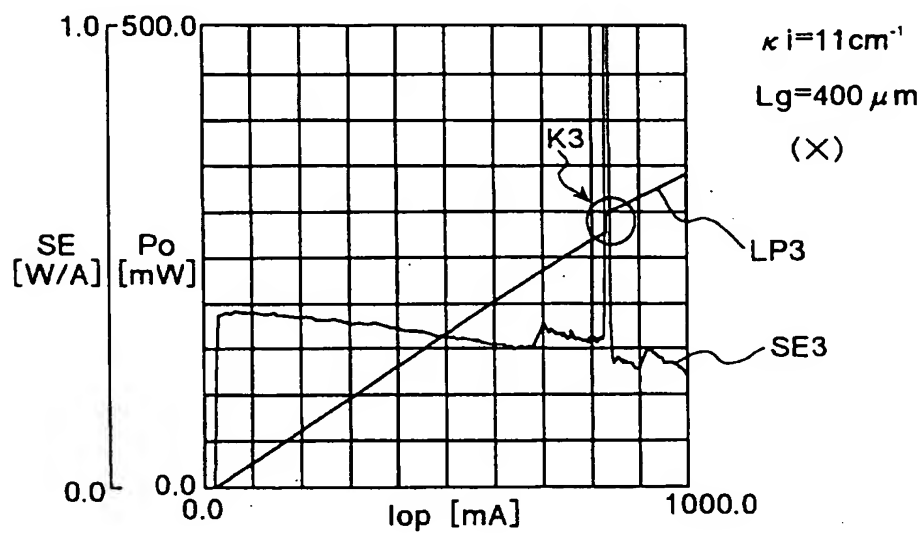
【図11】



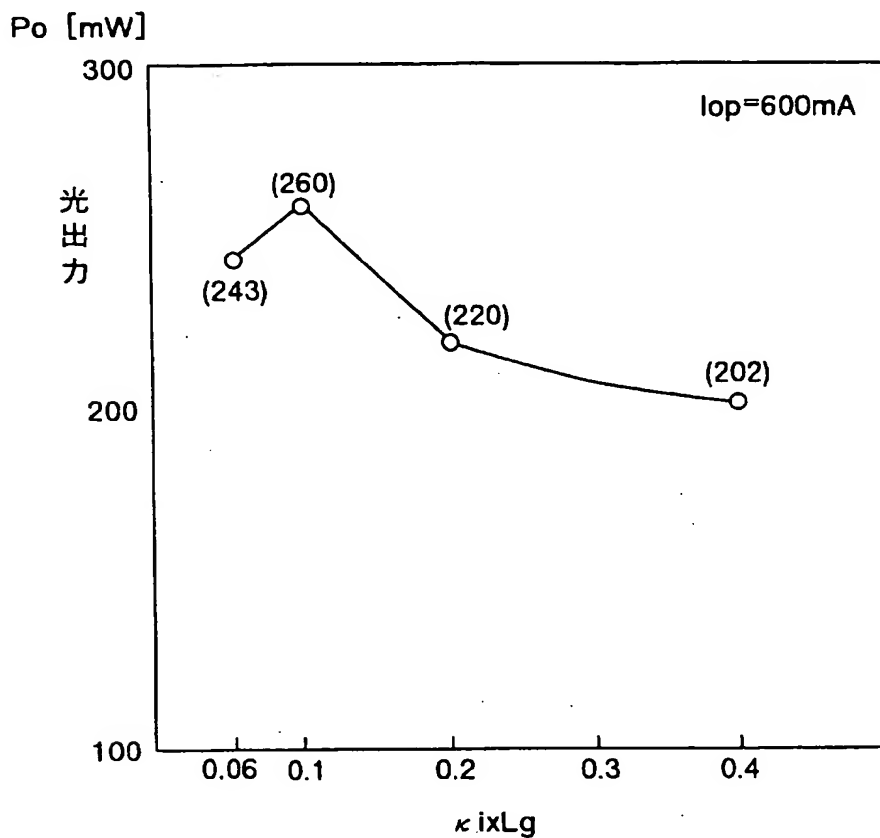
【図12】



【図13】



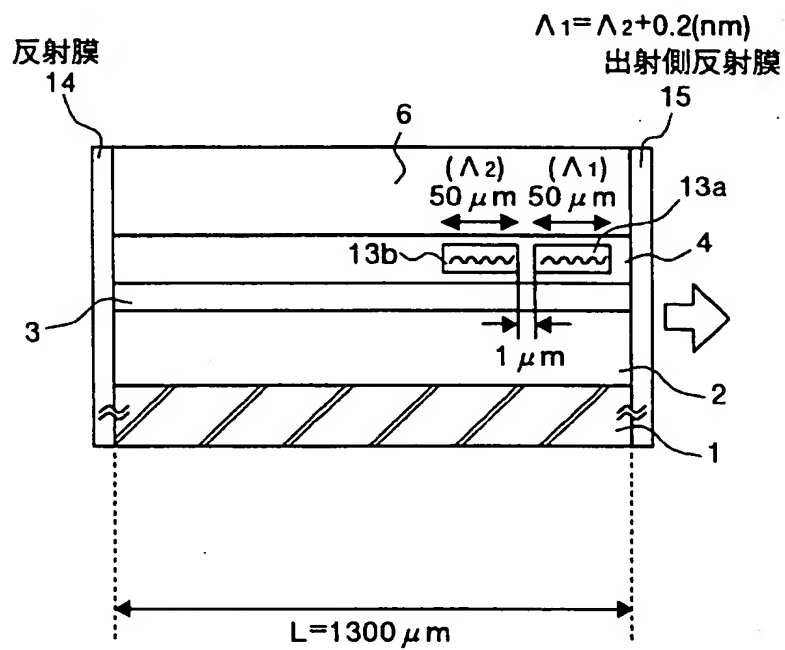
【図14】



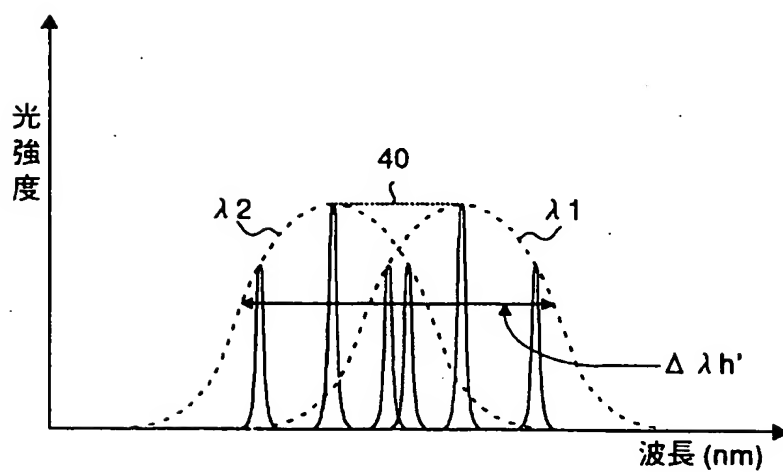
【図15】

回折格子とSCH層との間の厚さ dsp(nm)	回折格子の厚さ tgr(nm)	回折格子組成波長 $\lambda_{gr}(\mu\text{m})$	結合係数 $\kappa_i(\text{cm}^{-1})$	回折格子長 $L_g(\mu\text{m})$	$\kappa_{ix}L_g$
50	30	1.05	17.3	60	0.10
		1.1	24.4	40	
300	10	1.15	5.2	190	
		1.2	6.2	160	
100	10	1.25	12.2	40	0.05
		1.35	15.8	30	
200	20	1	4.8	110	
		1.3	23	20	

【図16】



【図17】

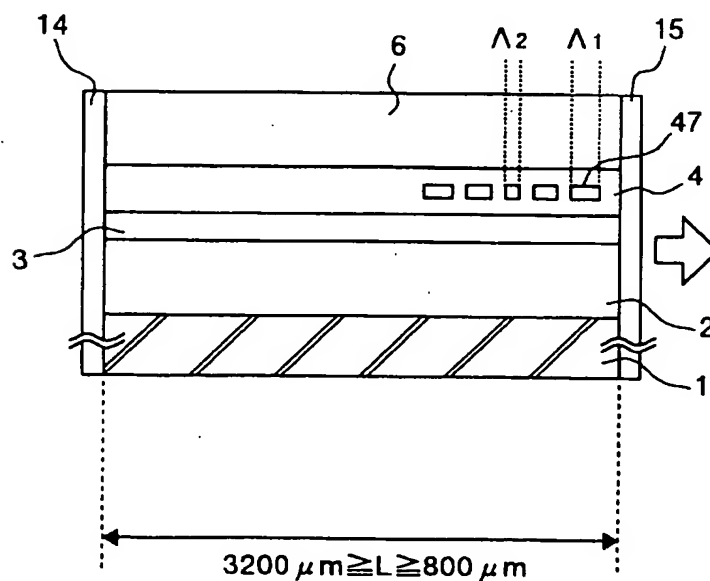


【図18】

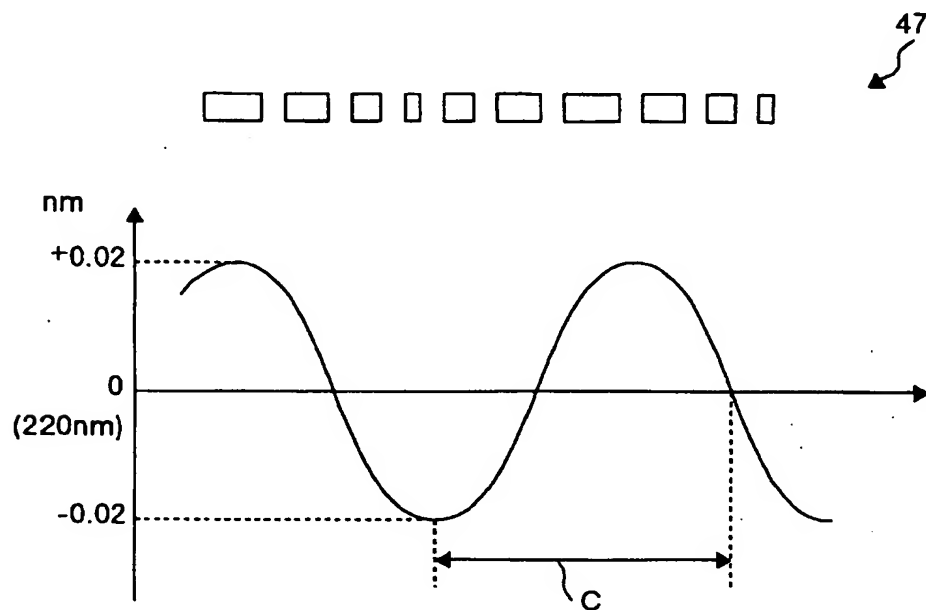
回折格子と GRIN-SCH層との 間の厚さ dsp(nm)	回折格子 の厚さ tgr(nm)	回折格子 組成波長 $\lambda_{gr}(\mu m)$	結合 係数 $\kappa l(cm^{-1})$	回折格子長Lg(μm)	
				100	50+50 (Λ_1) (Λ_2)
200	20	1.1	11	○ ($\kappa lLg=0.1$)	—
200	20	1.25	20	△ ($\kappa lLg=0.2$)	○
100	25	1.35	44	× ($\kappa lLg=0.4$)	—

○:I-L特性の線形性が良
△:I-L特性の線形性がやや良
×:I-L特性の線形性が不良

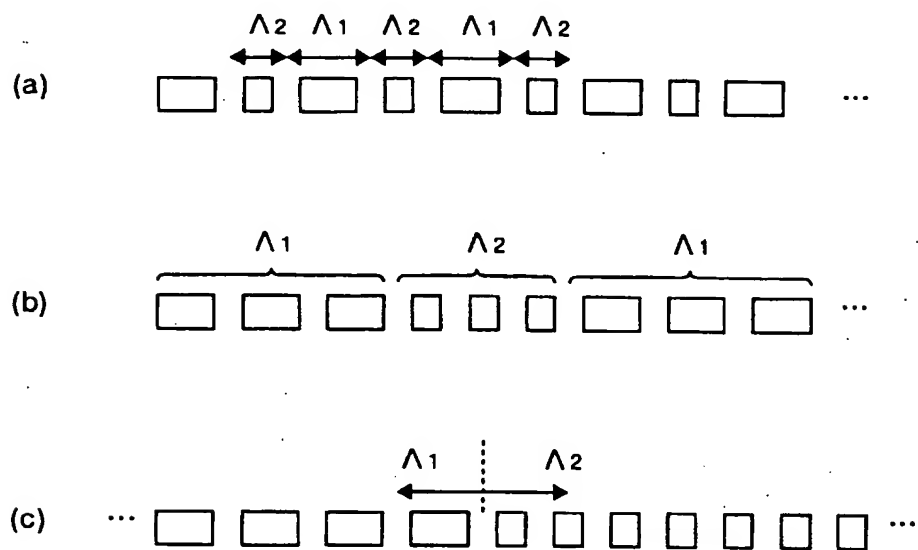
【図19】



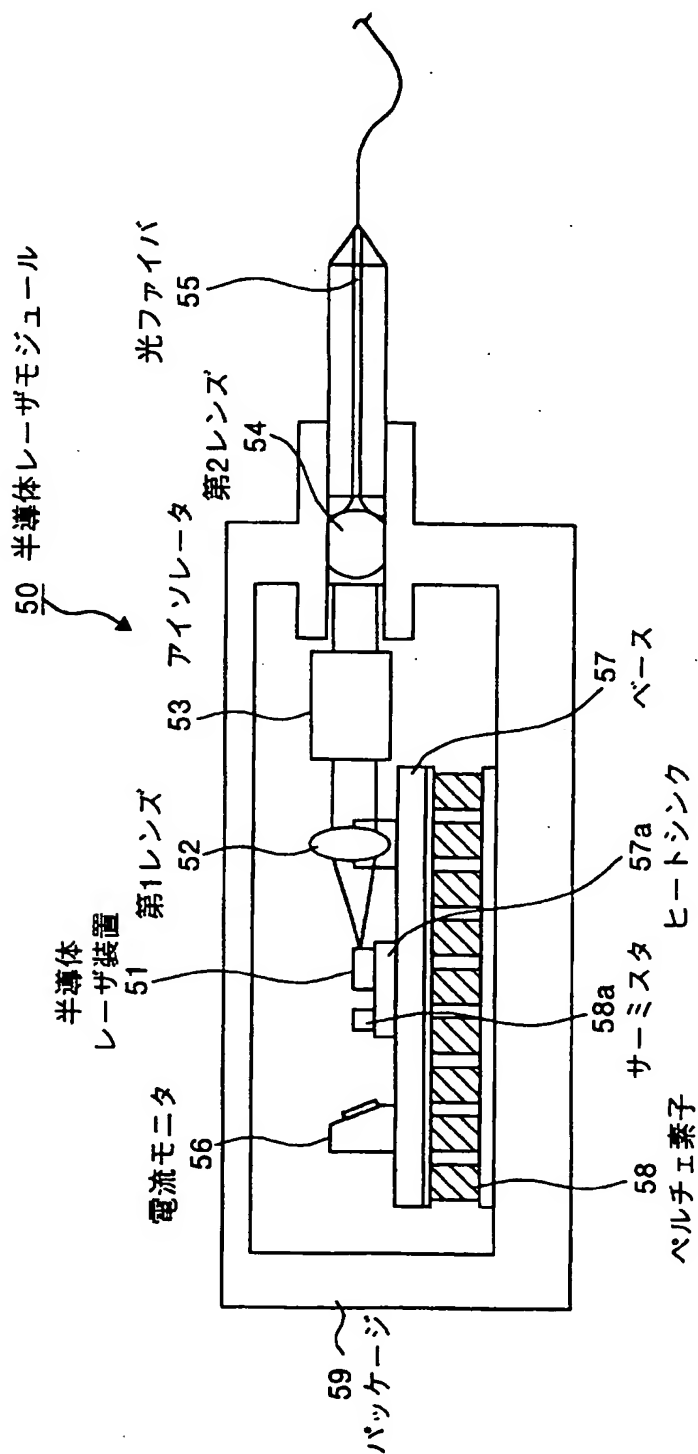
【図 20】



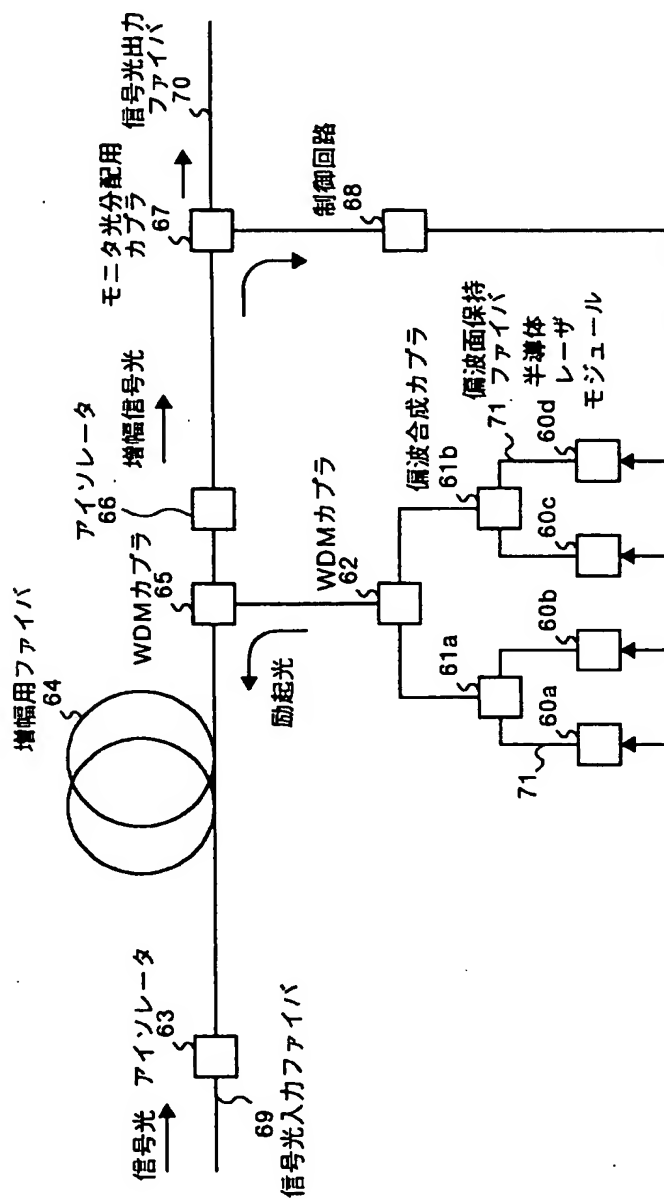
【図 2 1】



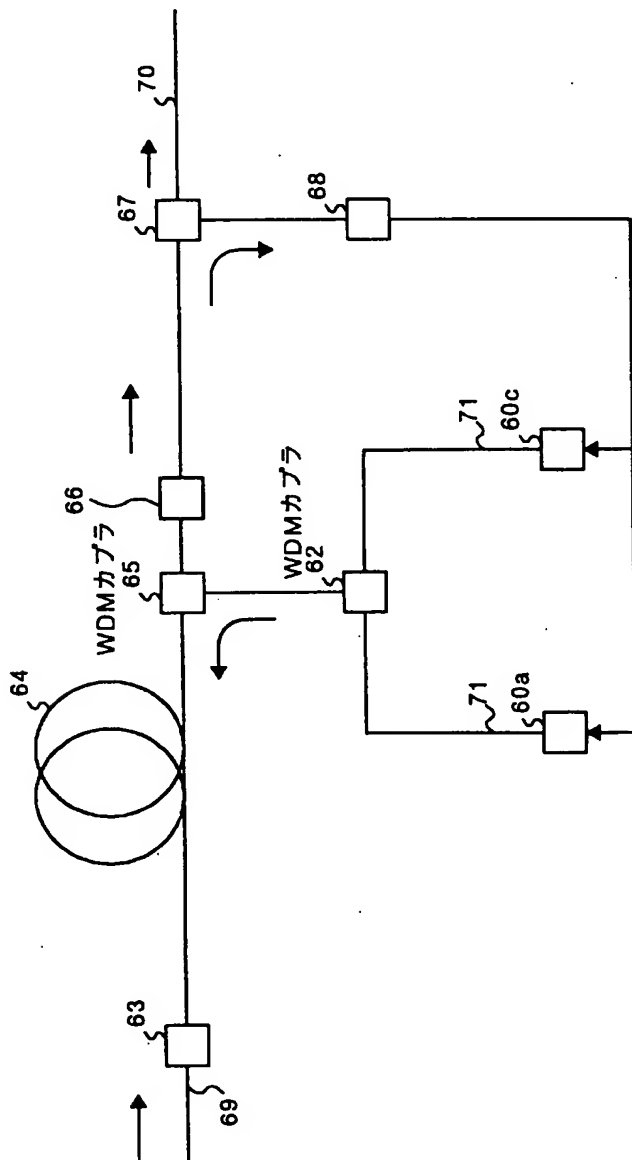
【図22】



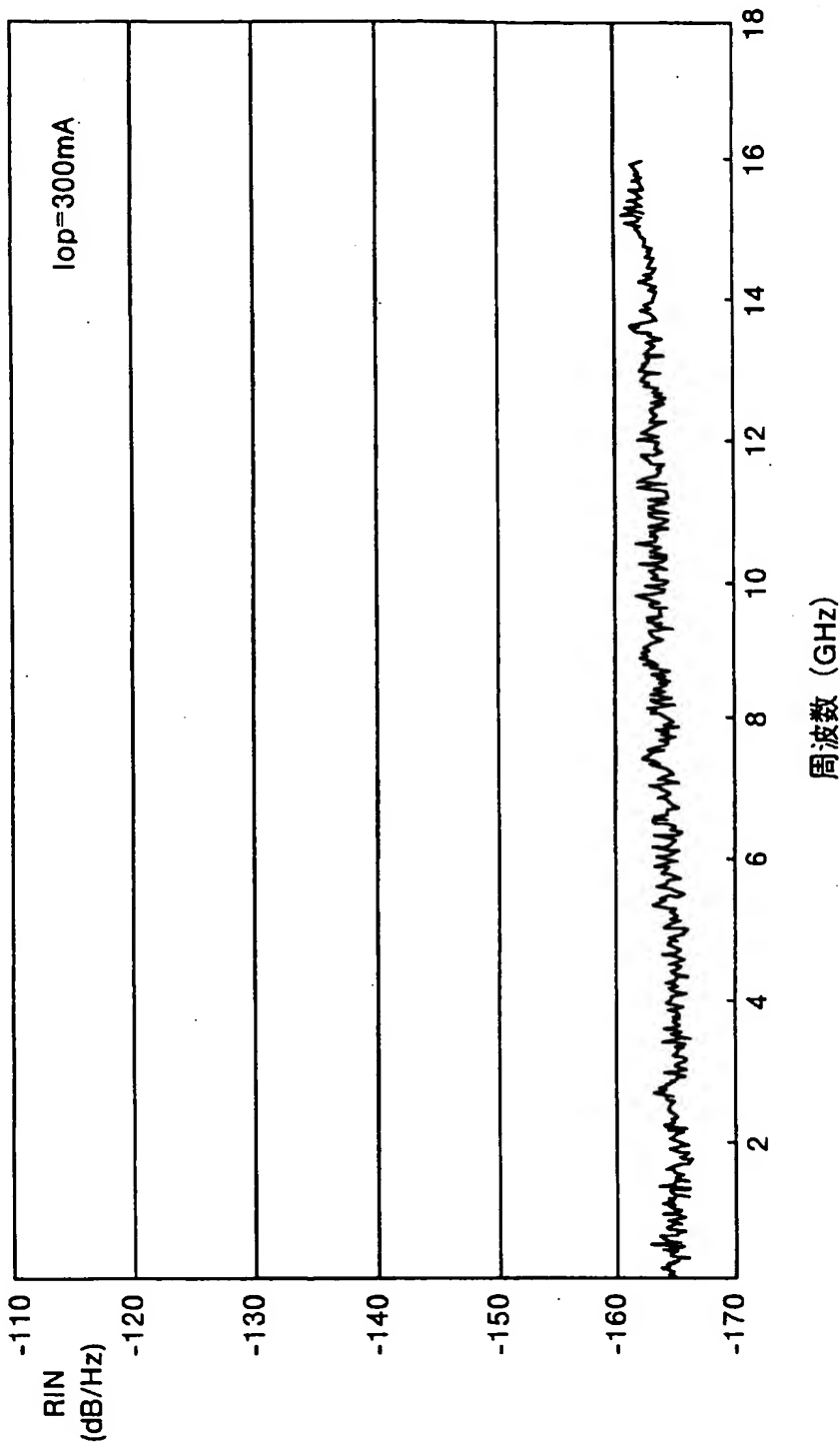
【図23】



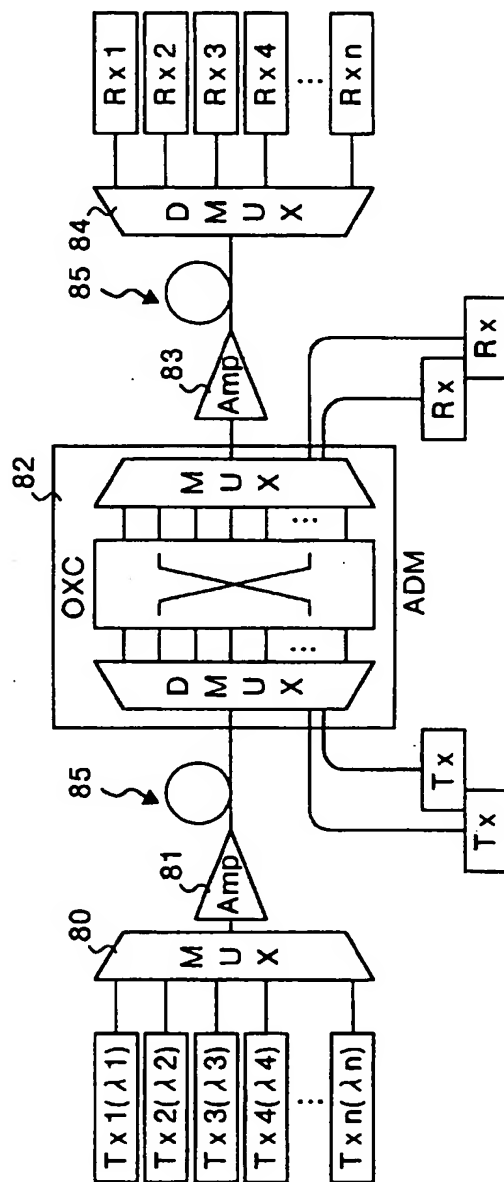
【図24】



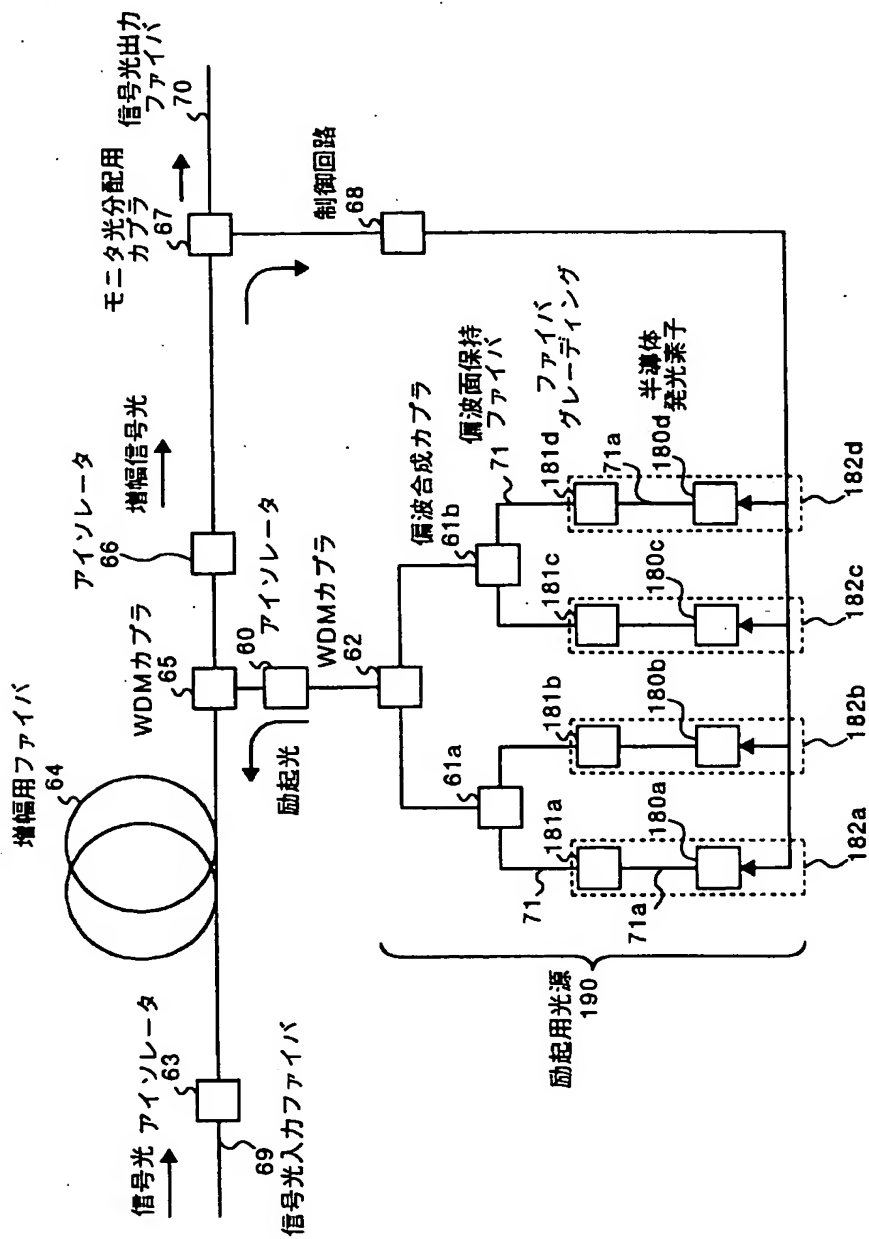
【図25】



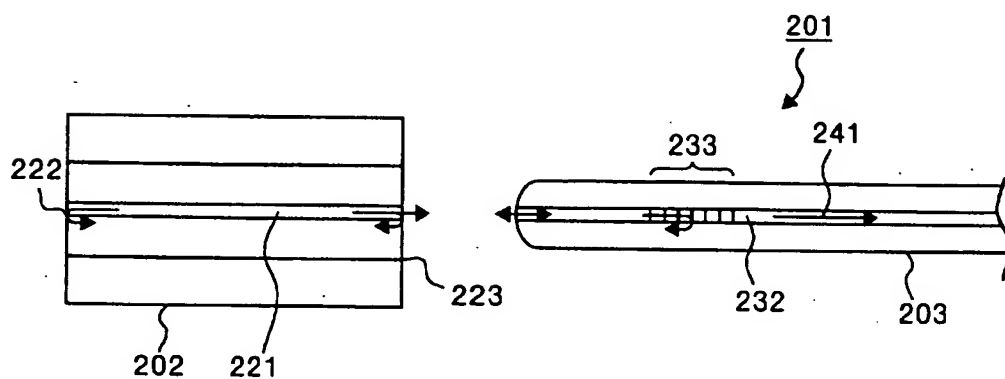
【図26】



【図27】



【図28】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 ラマン増幅器などの励起用光源に適し、低雑音特性と広いダイナミックレンジとを有し、安定かつ高利得増幅を可能とすること。

【解決手段】 レーザ光の出射端面に設けた出射側反射膜15と該レーザ光の反射端面に設けた反射膜14との間に形成されたGRIN-SCH-MQW活性層3の近傍であって出射側反射膜15側に回折格子13を設け、回折格子13の結合係数 κ_i と回折格子長 L_g との乗算値を0.3以下に設定する、共振器長 L_r と回折格子13の波長選択特性とを含む発振パラメータの組み合わせ設定によって発振波長スペクトルの半値幅内に2本以上の発振縦モードを含むレーザ光を出力する。

【選択図】 図2